

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJE MACIÇA E NERVURADA EM
ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL**

CLAUS MARCÉLIO DA SILVA FILHO

FLORIANÓPOLIS

2017

CLAUS MARCÉLIO DA SILVA FILHO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJE MACIÇA E NERVURADA EM
ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Graduação do Departamento
de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina como
requisito parcial para obtenção do título
de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Narbal Ataliba
Marcelino.

FLORINÓPOLIS

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva Filho, Claus Marcélio da

Estudo comparativo entre laje maciça e nervurada em
estrutura de concreto armado de um edifício residencial /
Claus Marcélio da Silva Filho ; orientador, Narbal Ataliba
Marcellino, 2017.

127 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Civil. 3. Concreto
Armado. 4. Dimensionamento Estrutural. 5. Lajes. I.
Marcellino, Narbal Ataliba. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CLAUS MARCÉLIO DA SILVA FILHO

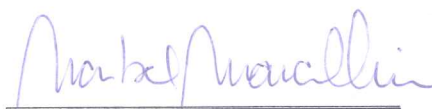
**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJE MACIÇA E NERVURADA EM
ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil aprovado em sua forma final pela Comissão Examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 24 de novembro de 2017.

Prof. Luciana Rohde
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Narbal Ataliba Marcellino

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lourenço Panosso Perlin
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alteviro Castro dos Santos, Dr.
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Este trabalho é dedicado aos meus
familiares e colegas da universidade.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo carinho e amor. Meu pai Claus, que tenho muito orgulho de ser seu filho, minha mãe Joelma, que me deu muito apoio emocional em momentos difíceis da graduação, e minha irmã Raissa, que me enche de orgulho e sempre acreditou em minha capacidade.

Aos meus professores do ensino médio do Colégio Energia de Itajaí, que tenho grande gratidão por seus ensinamentos que me proporcional ingressar na Universidade Federal de Santa Catarina.

Aos meus amigos dentro e fora do curso, pelos bons momentos e amizade verdadeira ao longo desses anos.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, pelos conhecimentos compartilhados de seus conhecimentos sobre a teoria e prática que envolve a profissão de Engenheiro Civil.

Ao professor Narbal, por sua orientação durante o TCC com que pude aprender muito durante a confecção deste trabalho, e apresentando disponibilidade mesmo em seus dias de descanso para responder com atenção minhas duvidas.

RESUMO

Com o intuito de consolidar os conceitos teóricos e técnicas práticas aprendidas ao longo do curso de Engenharia Civil, este trabalho apresenta o projeto estrutural de um pavimento de edifício residencial em concreto armado considerando as alternativas de lajes maciças, lajes nervuradas bidirecionais e unidirecionais. Com um comparativo que utiliza um orçamento da estimativa dos materiais usados em cada tipo de laje é definida a escolha da solução mais econômica para o pavimento estudado. A laje nervurada bidirecional foi o tipo de laje escolhida pelo seu menor consumo de concreto. Ao final do trabalho são apresentadas as considerações conclusões sobre as escolhas da alternativa de tipo de laje de concreto armado em pavimento de edifícios residenciais.

Palavras Chave: Concreto armado. Edifício residencial. Lajes maciças. Lajes nervuradas bidirecionais. Lajes nervuradas bidirecionais.

ABSTRACT

With the purpose of consolidating the theoretical concepts and practical techniques learned during the course of Civil Engineering, this paper presents the structural design of a residential building floor in reinforced concrete considering the alternatives of solid slabs, two - way ribbed slabs and unidirectional slabs. With a comparison that uses an estimate budget of the materials used in each type of slab, is defined the choice of the most economical solution for the studied floor. The bidirectional ribbed slab was the type of slab chosen for its lower concrete consumption. At the end of the paper, conclusions are presented on the choice of alternative type of reinforced concrete slab in residential buildings

Keywords: Reinforced Concrete. Residential Building. Solid Slabs. Two - way Ribbed Slabs. Unidirectional Ribbed Slabs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.2.1 – ARQUITETÔNICO – PAVIMENTO TIPO.....	7
FIGURA 3.1 – LANÇAMENTO ESTRUTURAL - PAVIMENTO TIPO.....	9
FIGURA 4.1.1 – CARREGAMENTO DE PAREDE NA MAIOR DIREÇÃO DE LAJE UNIDIRECIONAL.....	11
FIGURA 4.1.2 – CARREGAMENTO DE PAREDE NA MENOR DIREÇÃO DE LAJE UNIDIRECIONAL.....	11
FIGURA 4.2.1 – VINCULAÇÕES DAS LAJES DO PAVIMENTO TIPO.....	13
FIGURA 4.2.2 – APOIOS.....	14
FIGURA 4.2.3 – CARREGAMENTO DE CÁLCULO DE L5.....	16
FIGURA 4.2.4 – CARREGAMENTO DE CÁLCULO DE L16.....	16
FIGURA 4.3.1 – SEÇÃO 1 LAJE NERVURADA BIDIRECIONAL.....	40
FIGURA 4.4.1 – SEÇÃO 1 LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL.....	72
FIGURA 4.4.2 – SEÇÃO 2 LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL.....	73
FIGURA 4.4.3 – SEÇÃO 3 LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL.....	73
FIGURA 4.5.1 – CONSUMO DE CONCRETO EM M ³ DE TODAS AS LAJES DO PAVIMENTO.....	87
FIGURA 4.5.2 – CONSUMO EM KG DO AÇO DE TODAS AS LAJES DO PAVIMENTO.....	88
FIGURA 4.5.3 – CUSTO TOTAL DO AÇO E DO CONCRETO.....	88
FIGURA 4.6.1 – CARREGAMENTOS DE CÁLCULO NO ELU VIGA 43.....	90
FIGURA 4.6.2 – DIAGRAMA DE ESFORÇO CORTANTE NO ELU DA VIGA 43.....	91
FIGURA 4.6.3 – DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES NO ELU DA VIGA 43.....	91
FIGURA 4.6.4 – DIAGRAMA DE DEFORMAÇÃO DO VÃO 1 DA VIGA 43.....	92
FIGURA 4.6.5 – DIAGRAMA DE DEFORMAÇÃO NO APOIO 1 DA VIGA 43.....	93
FIGURA 4.6.6 – GRÁFICO DA FLECHA IMEDIATA DA VIGA 43.....	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1.1 – CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	2
TABELA 2.1.2 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E QUALIDADE DO CONCRETO.....	3
TABELA 2.1.3 – CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO UTILIZADO.....	4
TABELA 2.1.4 – PROPRIEDADES DOS AÇOS UTILIZADOS.....	4
TABELA 2.1.5 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E COBRIMENTO NOMINAL.....	5
TABELA 2.1.6 – EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E A PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	6
TABELA 4.1.1 – CARGAS ATUANTES NAS LAJES.....	10
TABELA 4.2.1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS LAJES.....	14
TABELA 4.2.2 – MOMENTOS MÁXIMOS DAS LAJES NO ELU.....	16
TABELA 4.2.3 MOMENTOS COMPATIBILIZADOS E CORRIGIDOS NO ELU.....	17
TABELA 4.2.3 – CÁLCULO DA ARMADURA POSITIVA NECESSÁRIA.....	18
TABELA 4.2.4 – VALORES MÍNIMOS PARA ARMADURAS PASSIVAS ADERENTES.....	20
TABELA 4.2.5 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA POSITIVA EFETIVA.....	21
TABELA 4.2.6 – ARMADURA SECUNDÁRIA DAS LAJES UNIDIRECIONAIS.....	23
TABELA 4.2.7 – CÁLCULO DA ARMADURA NEGATIVA DE AÇO.....	23
TABELA 4.2.8 – ARMADURA NEGATIVA DE AÇO EFETIVA.....	25
TABELA 4.2.8 – REAÇÕES DE APOIO.....	27
TABELA 4.2.9 – VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CISALHAMENTO.....	28
TABELA 4.2.10 CÁLCULO DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO.....	31
TABELA 4.2.11 – VERIFICAÇÃO DE FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO FREQUENTE.....	31
TABELA 4.2.12 – VERIFICAÇÃO DE FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO QUASE PERMANENTE.....	32

TABELA 4.2.13 – CÁLCULO DA LINHA NEUTRO NO ESTÁDIO DOIS PURO.....	33
TABELA 4.2.14 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA NO ESTÁDIO DOIS PURO.....	34
TABELA 4.2.15 – DADOS INICIAIS PARA CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAS.....	35
TABELA 4.2.16 – AREA DE CONCRETO E TAXA DE ARMADURA DA REGIÃO ENVOLVIDA.....	35
TABELA 4.2.17 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DAS LAJES.....	36
TABELA 4.2.18 – CÁLCULO DA FLECHA ELÁSTICA PARA LAJES BIDIRECIONAIS.....	37
TABELA 4.2.19 – CÁLCULO DA FLECHA ELÁSTICA PARA LAJES UNIDIRECIONAIS.....	37
TABELA 4.2.20 CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À FLUÊNCIA.....	38
TABELA 4.2.21 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À CARGA VERTICAL DE USO.....	39
TABELA 4.2.22 – CUSTOS DOS MATERIAIS.....	39
TABELA 4.3.1 – CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DA NERVURA.....	40
TABELA 4.3.2 – CÁLCULO DO VÃO EFETIVO.....	41
TABELA 4.3.3 – CÁLCULO DO NUMERO DE NERVURAS E VOLUME DAS NERVURAS...	42
TABELA 4.3.4 – CÁLCULO DO PESO PRÓPRIO DISTRIBUIDO NA LAJE.....	42
TABELA 4.3.5 – CARGAS E MOMENTOS FLETORES FINAIS DEVIDO COMBINAÇÃO ÚLTIMA.....	43
TABELA 4.3.6 – CÁLCULO DA ARMADURA POSITIVA NECESSÁRIA.....	44
TABELA 4.3.7 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA POSITIVA EFETIVA.....	46
TABELA 4.3.8 – CÁLCULO DA ARMADURA NEGATIVA NECESSÁRIA.....	47
TABELA 4.3.9 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA NEGATIVA EFETIVA.....	48
TABELA 4.3.10 – CÁLCULO DAS REAÇÕES DE APOIO.....	50
TABELA 4.3.11 – VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CISALHAMENTO.....	51
TABELA 4.3.12 – CÁLCULO DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO.....	53
TABELA 4.3.13 – VERIFICAÇÃO DA FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO FREQUENTE.....	53

TABELA 4.3.14 – VERIFICAÇÃO DA FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO QUASE PERMANENTE.....	54
TABELA 4.3.15 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA DO ESTÁDIO DOIS PURO.....	55
TABELA 4.3.16 – DADOS INICIAIS PARA CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAS.....	57
TABELA 4.3.17 – AREA DE CONCRETO E TAXA DE ARMADURA DA REGIÃO ENVOLVIDA.....	60
TABELA 4.3.18 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DAS LAJES.....	62
TABELA 4.3.19 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA EQUIVALENTE.....	65
TABELA 4.3.20 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA EQUIVALENTE PARA A LAJE.....	67
TABELA 4.3.21 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A DEFORMAÇÃO ELÁSTICA E A FISSURAÇÃO.....	68
TABELA 4.3.22 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A FLUÊNCIA.....	69
TABELA 4.3.23 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À CARGA VERTICAL DE USO.....	70
TABELA 4.3.24 – ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO DA MESA.....	70
TABELA 4.2.25 – CUSTOS DOS MATERIAIS.....	71
TABELA 4.4.1 – CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DA NERVURA.....	72
TABELA 4.4.2 – CÁLCULO DO VÃO EFETIVO.....	73
TABELA 4.4.3 – CÁLCULO DO NÚMERO DE NERVURAS E VOLUME DAS NERVURAS...	74
TABELA 4.4.4 – CÁLCULO DO PESO PRÓPRIO DA LAJE.....	74
TABELA 4.4.5 – CARGAS E MOMENTOS FLETORES COM COBINAÇÃO ÚLTIMA.....	75
TABELA 4.4.6 – CÁLCULO DA ÁREA DE AÇO NECESSÁRIA.....	76
TABELA 4.4.7 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA EFETIVA.....	76
TABELA 4.4.8 – CÁLCULO DAS REAÇÕES DE APOIO.....	77
TABELA 4.4.9 – VERIFICAÇÃO DO ESFORÇO DE CISALHAMENTO.....	78
TABELA 4.4.10 – CÁLCULO DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO.....	79

TABELA 4.4.11 – VERIFICAÇÃO DA FISSURAÇÃO.....	79
TABELA 4.4.12 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA NO ESTÁDIO II PURO.....	80
TABELA 4.4.13 – DADOS INICIAIS PARA O CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAS.....	80
TABELA 4.4.14 – CÁLCULO DA ÁREA PROTEGIDA E TAXA DE ARMADURA.....	81
TABELA 4.4.15 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DAS LAJES.....	81
TABELA 4.4.16 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA EQUIVALENTE.....	82
TABELA 4.4.17 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A DEFORMAÇÃO ELÁSTICA E FISSURAÇÃO.....	83
TABELA 4.4.18 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A FLUÊNCIA DOS MATERIAIS.....	83
TABELA 4.4.19 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À CARGA VERTICAL DE USO.....	84
TABELA 4.4.20 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO.....	85
TABELA 4.4.21 – CUSTO DOS MATERIAIS.....	86
TABELA 4.5.1 – RESUMO DO QUANTITATIVO.....	87
TABELA 4.6.1 – ARMADURA DE FLEXÃO DA VIGA 43.....	94
TABELA 4.6.2 – ARMADURA TRANSVERSAL DA VIGA 43.....	95
TABELA 4.6.3 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA NO ESTÁDIO II PURO.....	95
TABELA 4.6.4 – CÁLCULO DA FLECHA DA VIGA 43.....	96
TABELA 4.6.5 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DA VIGA 43.....	97
TABELA 4.6.6 – CÁLCULO A ANCORAGEM.....	100
TABELA 4.6.7 – CÁLCULOS DA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL.....	103

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – OBJETIVOS.....	1
2 – APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA.....	2
2.1 – LOCALIZAÇÃO.....	2
2.1.1 – Classe de Agressividade Ambiental.....	2
2.1.2 – Materiais Utilizados.....	3
2.1.2.1 – Concreto.....	3
2.1.2.2 – Aço.....	4
2.1.3 – Cobrimentos Adotados.....	5
2.1.4 – Estado de Abertura de Fissuras.....	5
2.2 – PROJETO ARQUITETÔNICO.....	6
3 – MODELAGEM DA ESTRUTURA.....	8
4 – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	10
4.1 – AÇÕES ATUANTES E COMBINAÇÕES CONSIDERADAS.....	10
4.1.1 – Cargas Permanentes.....	10
4.1.2 – Cargas Acidentais.....	12
4.1.3 – Combinações.....	12
4.2 – LAJES MACIÇAS.....	13
4.2.1 – Generalidades.....	13
4.2.2 – Estado Limite Último.....	15
4.2.2.1 – Momentos Fletores.....	15
4.2.2.2 – Armadura Positiva de Flexão.....	18
4.2.2.3 – Armadura Negativa de Flexão.....	23
4.2.2.4 – Reações de Apoio.....	27

4.2.2.5 – Cisalhamento.....	28
4.2.3 – Estado Limite de Serviço.....	30
4.2.3.1 – Verificação de Fissuração.....	30
4.2.3.2 – Fissuração.....	32
4.2.3.3 – Flecha.....	36
4.2.4 – Quantitativo e Custoso dos Materiais.....	39
4.3 – LAJE NERVURADA BIDIRECIONAL.....	40
4.3.1 – Generalidades.....	40
4.3.2 – Estado Limite Último.....	43
4.3.2.1 – Momentos Fletores.....	43
4.3.2.2 – Armadura Positiva de Flexão.....	44
4.3.2.3 – Armadura Negativa de Flexão.....	47
4.3.2.4 – Reações de Apoio.....	50
4.3.2.5 – Cisalhamento.....	50
4.3.3 – Estado Limite de Serviço.....	53
4.3.3.1 – Verificação de Fissuração.....	53
4.3.3.2 – Fissuração.....	54
4.3.3.3 – Flecha.....	65
4.3.4 – Armadura de Distribuição.....	70
4.3.5 – Quantitativo e Custos dos Materiais.....	71
4.4 – LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL.....	72
4.4.1 – Generalidades.....	72
4.4.2 – Estado Limite Último.....	75
4.4.2.1 – Momentos Fletores.....	75
4.4.2.3 – Armadura Positiva de Flexão.....	76

4.4.2.4 – Reações de Apoio.....	77
4.4.2.5 – Cisalhamento.....	78
4.4.3 – Estado Limite de Serviço.....	78
4.4.3.1 – Verificação da fissuração.....	79
4.4.3.2 – Fissuração.....	80
4.4.3.3 – Flecha.....	82
4.4.4 – Armadura de Distribuição.....	85
4.4.5 – Quantitativo e Custos dos Materiais.....	86
4.5 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS DE LAJES.....	87
4.6 – DIMENSIONAMENTO DA VIGA V43.....	90
4.6.1 – Estado Limite Último.....	90
4.6.2 – Armadura de Flexão.....	91
4.6.3 – Armadura de Cisalhamento.....	94
4.6.4 – Estado Limite de Serviço.....	95
4.6.5 – Ancoragem nos Apoios.....	98
4.6.6 – Distribuição Longitudinal.....	100
5 – CONCLUSÃO.....	104
5.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
6 – REFERÊNCIAS.....	105

1 – INTRODUÇÃO

A proposição deste trabalho é apresentar um estudo de comparação entre o dimensionamento de laje maciça, nervurada bidirecional e unidirecional para um pavimento de um edifício residencial de concreto armado. Assim, será revisado e consolidado parte dos conceitos teóricos e técnicas práticas aprendidas ao longo do curso de Engenharia Civil. Pois, é parte integrante e primordial do Engenheiro Civil o conhecimento do comportamento das estruturas, como análise dos esforços, deformações e a interpretação dos resultados. Utilizando essas três características, pode-se aplicá-las para projetar a estrutura de uma edificação que possibilite o racionamento de recursos materiais e financeiros, obedeça à normalização em vigor, satisfaça critérios de segurança e seja durável.

A apresentação do trabalho seguirá a seguinte ordem: apresentação da estrutura, ações consideradas atuantes na edificação, dimensionamento das lajes do pavimento como laje maciça, nervurada bidirecional e unidirecional, escolha da alternativa mais econômica e apresentação das conclusões sobre o dimensionamento e escolha da alternativa de tipo de laje de concreto armado a ser utilizada em um edifício.

Assim, primeiramente serão especificadas as condições de localização do edifício que implica nos cobrimentos e concretos adotados, em seguida é descrito a edificação com a exibição da planta arquitetônica que indica as dimensões do pavimento e as paredes que deverão ser consideradas. Com isso a concepção estrutural é realizada, determinando a posição e dimensões dos elementos estruturais do pavimento, essa concepção será feita considerando inicialmente o uso de lajes maciças.

Após o pré-dimensionamento, são definidas as cargas atuantes na estrutura do pavimento e com isto é realizado o foco do trabalho que é o dimensionamento do pavimento para os três tipos escolhidos de laje de concreto armado a serem utilizadas. Para cada alternativa de laje aqui estudada é feito um quantitativo de consumo de volume de concreto e área de aço, para então compará-las e definir a mais econômica solução para o pavimento que elas foram dimensionadas.

Ao final do trabalho é comentado com mais detalhes a escolha da melhor solução para o pavimento tipo estudado e são apresentadas algumas conclusões sobre a escolha da alternativa de tipo de laje de concreto armado em pavimento de edifícios residenciais.

1.1 – OBJETIVOS

Aplicar os conhecimentos adquiridos durante o período de graduação, em aula, em campo e em escritório, para dimensionar as lajes do pavimento utilizando lajes maciças, lajes nervuradas bidirecionais e unidirecionais. Comparar os resultados das soluções e definir a opção mais econômica entre as três com a devida consideração da produtividade e do orçamento.

2 – APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA

2.1 – LOCALIZAÇÃO

O edifício que o pavimento que aqui será estudado será construído na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, cidade litorânea com boa parte do seu território sendo insular. No entanto, a estrutura não se localiza próximo ao mar, sendo assim, seu ambiente é de classificação urbana com agressividade moderada e risco pequeno de deterioração da estrutura. ‘

2.1.1 – Classe de Agressividade Ambiental

Com a tabela 2.1.1, é definido que a edificação se enquadra na Classe II – Moderada, pois mesmo elas estando em uma cidade litorânea, a obra se localiza longe das intempéries marítimas. Tal classificação define a classe do concreto a ser utilizada e o comprimento nominal do cobrimento a ser utilizado.

TABELA 2.1.1 – CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

FONTE: NBR 6118:2014 – Tabela 6.1

2.1.2 – Materiais Utilizados

2.1.2.1 – Concreto

Ainda na norma NBR 6118:2014, a Tabela 2.1.2 indica o limite da relação água/cimento e a classe de concreto indicada para as classes de agressividade. Assim, determina-se que será utilizado o concreto armado a ser utilizado nos elementos estruturais aqui estudados deverá ser de classe C25, que segundo a NBR 8953:1992, a classe C25 resulta na resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (f_{ck}) de 25 MPa.

TABELA 2.1.2 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E QUALIDADE DO CONCRETO

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655. ^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado. ^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

FONTE: NBR 6118:2014 – Tabela 7.1

A partir do f_{ck} já será determinado sua resistência característica média à tração do concreto aos 28 dias ($f_{ctk,m}$), a resistência característica inferior à tração do concreto aos 28 dias ($f_{ctk,inf}$) e a resistência característica superior à tração aos 28 dias ($f_{ctk,sup}$). Estes valores são obtidos através das seguintes formulas indicadas pelo item 8.2.5 da norma NBR 6118:2014:

$$f_{ctk,m} = 0,3 * f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 * f_{ctk,m}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 * f_{ctk,m}$$

Porém para utilização dessas características no cálculo estrutural, considerando o estado limite ultimo do concreto, é necessário dividir essas grandezas pelo coeficiente de ponderação das resistências no estado limite último (γ), que para o concreto $\gamma_c = 1,4$

A tabela abaixo apresenta os valores característicos e de cálculo da resistência à compressão e tração do concreto utilizado no trabalho.

TABELA 2.1.3 – CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO UTILIZADO

Unidade	Classe	Compressão	Tração Média	Tração Inferior	Tração superior
MPa	Característico	fck = 25,00	fckt,m = 2,565	fctk,inf = 1,796	fctk,sup = 3,334
	Cálculo	fcd = 17,857	fctd,m = 1,832	fctd,inf = 1,282	fctd,sup = 2,381
kPa	Característico	fck = 25000	fckt,m = 2565	fctk,inf = 1796	fctk,sup = 3334
	Cálculo	fcd = 17857	fctd,m = 1832	fctd,inf = 1282	fctd,sup = 2381

A partir do fck pode-se também calcular o módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}), no entanto a norma NBR 6118:2014 indica que se deve utilizar o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) para determinar os esforços solicitantes. Estas características são calculadas pelas seguintes formulas:

$$E_{ci} = 5600 * \sqrt{fck}$$

$$E_{cs} = E_{ci} * 0,85$$

Portanto, com o fck=25 MPa, tem-se que $E_{ci} = 28000$ e $E_{cs} = 23800$.

2.1.2.2 – Aço

Os tipos de aço utilizados nesse trabalho serão o CA-60 para os fios de Φ 5 mm que serão utilizados na armadura positiva das lajes, armaduras de distribuição na mesa da laje e estribos em vigas e o CA-50 com os diâmetros de Φ 6,3mm, Φ 8 mm, Φ 10 mm e Φ 12,5mm que serão empregados em armadura positiva e negativa de laje e nas armaduras longitudinais das vigas.

Assim como o concreto, a resistência à tração do aço no dimensionamento do estado limite ultimo deve ser dividida pelo coeficiente do aço da ponderação das resistências no estado limite último ($\gamma_s = 1,15$). Quanto ao módulo de elasticidade (E_s), é utilizado o $E_s = 210000$ MPa para ambos como indicado pela ABNT. Estas propriedades do aço estão resumidas na tabela 2.1.4 abaixo.

TABELA 2.1.4 – PROPRIEDADES DOS AÇOS UTILIZADOS

	fyk (MPa)	fyd (MPa)	Es (MPa)
CA-50	500	434,78	210000
CA-60	600	521,74	

2.1.3 – Cobrimentos Adotados

O comprimento nominal dos cobrimentos é determinado pela classe de agressividade ambiental como apresentado na tabela 2.1.5 e o item 7.4.74 da NBR 6118:2014, assim, o cobrimento utilizado será de 25mm para lajes.

TABELA 2.1.5 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E COBRIMENTO NOMINAL

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

FONTE: NBR 6118:2014 – Tabela 6.1

2.1.3 – Estado Limite de Abertura de Fissuras (ELS-W)

Na tabela 2.1.5 segue as exigências da norma NBR 6118:2014 quanto ao limite de abertura de fissuração, fica definido então que a abertura característica de fissuras na superfície do concreto deverá ser $w_k \leq 0,3$ mm.

TABELA 2.1.6 – EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E A PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

FONTE: NBR 6118:2014 – Tabela 13.4

2.2 PROJETO ARQUITETÔNICO

O edifício escolhido como objeto de estudo possui quatro pavimentos tipos, e neste trabalho apenas especificaremos o pavimento tipo. Cada pavimento tipo possui uma área total de 338,11 m² (sem descontar o vão dos elevadores) que é dividida entre quatro apartamentos, hall social e escada. Os apartamentos são divididos em tipo 1 e Tipo 2 ficando em que o tipo 1 possui uma área total de 70,24m² e o tipo 2 possui 78,94m². O hall social possui área de 17,02m² descontando a área do vão dos elevadores e escada possui área de 11,76m². Na figura 2.2.1 segue o desenho arquitetônico sem escala do pavimento tipo que será dimensionado.

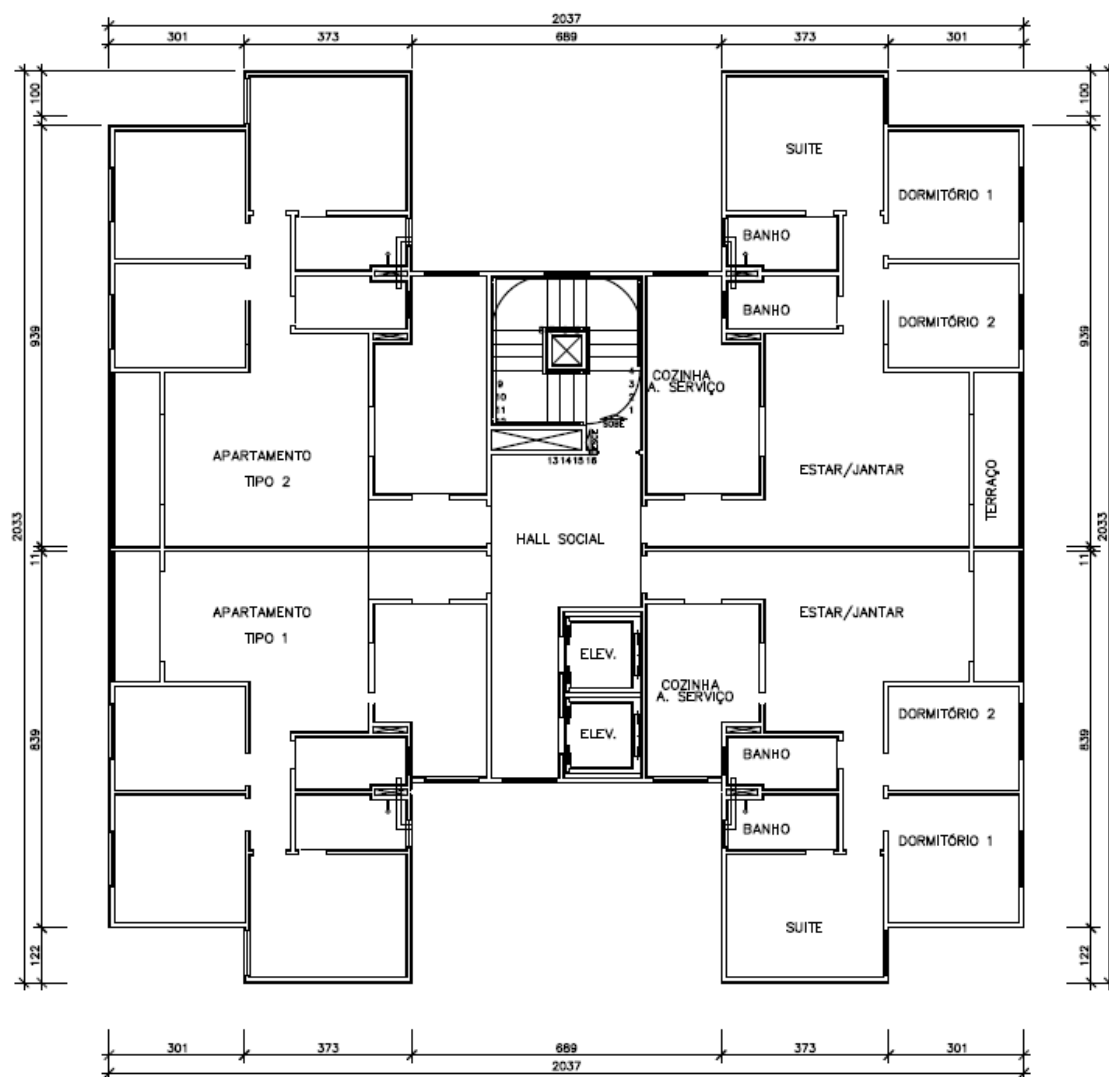


FIGURA 2.2.1 ARQUITETÔNICO – PAVIMENTO TIPO

3 – MODELAGEM DA ESTRUTURA

A modelagem da estrutura foi feita através de vários estudos, visando alternativas para a posição e dimensões dos elementos estruturais do pavimento tipo. Primeiramente foram definidas as posições dos pilares, com os pilares de canto e de contorno da escada sendo os primeiros a serem definidos. Após isso os pilares foram definidos de forma que o vão das futuras vigas não fossem maiores que 5 m, além disso foi evitado o posicionamento de pilares no interior dos cômodos para não causar inconveniências com o projeto arquitetônico, suas dimensões foram consideradas 20 cm x 40 cm.

Após o posicionamento dos pilares foram modeladas as vigas com a intenção de alinhá-las à alvenaria prevista no projeto arquitetônico para que carga de parede descarregasse diretamente sobre elas, no entanto em áreas de corredores foi considerado um exagero seguir a esta regra para delimitar uma área pequena de corredor, suas dimensões foram inicialmente consideradas como 12 cm x 40 cm. Assim, com as vigas definidas as lajes foram delimitadas pelas vigas que as contornam, devido à arquitetura em “L” de alguns cômodos as lajes mantiveram tal formato para estes casos e no caso dos corredores e entrada dos apartamentos as lajes acabaram ficando com carga de parede sobre elas, as lajes foram consideradas maciças neste pré-dimensionamento inicial com a altura de 12 cm. A figura 3.1 a seguir expõe o pavimento tipo com sua forma estrutural concebida.

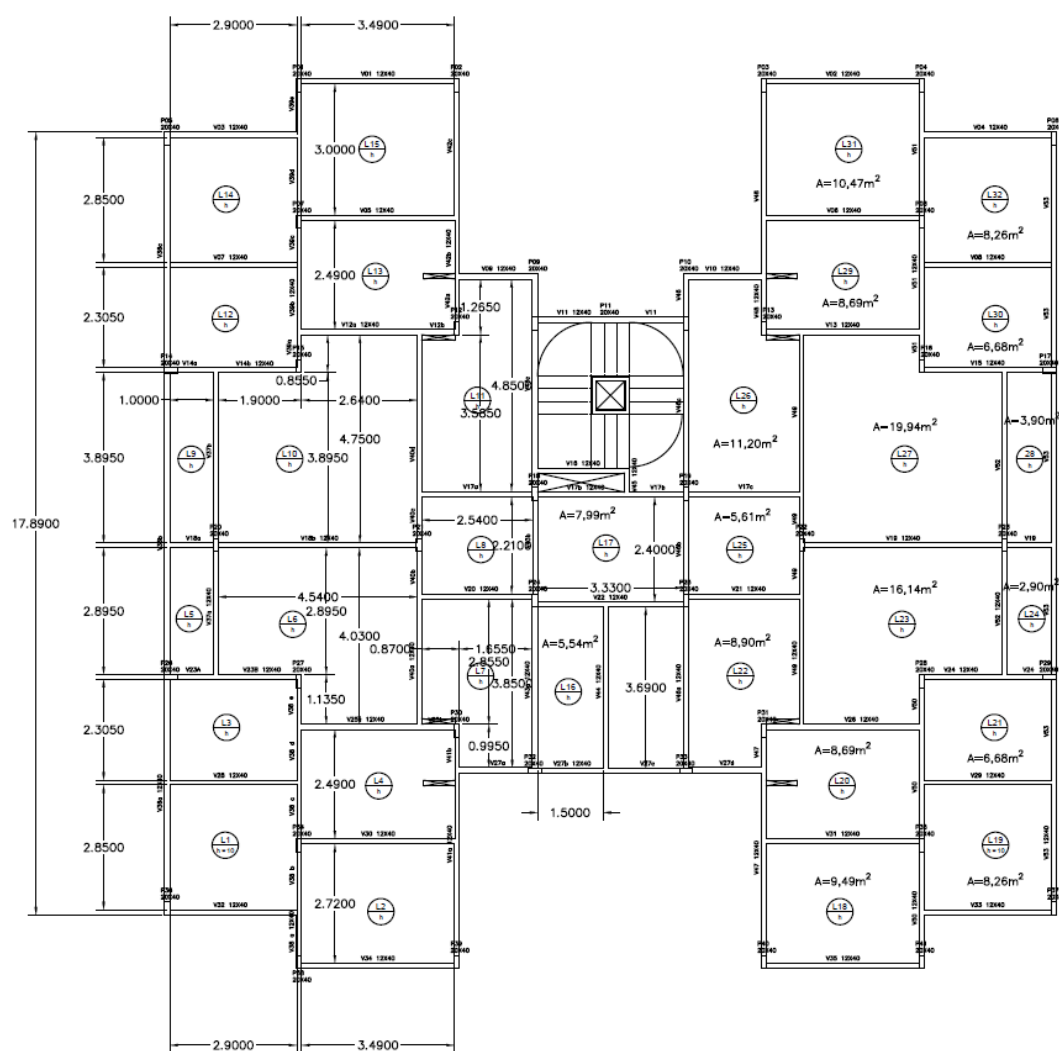


FIGURA 3.1 LANÇAMENTO ESTRUTURAL - PAVIMENTO TIPO

4 – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

4.1 – AÇÕES ATUANTES E COMBINAÇÕES CONSIDERADAS

Como o objetivo deste trabalho não é o dimensionamento inteiro de uma edificação, mas sim a comparação entre alternativas de lajes de concreto armado, serão consideradas apenas as cargas provenientes das ações de peso próprio da estrutura e cargas verticais de uso da construção.

4.1.1 – Cargas permanentes

A tabela 4.1.1 a seguir indica os carregamentos permanentes (F_g) considerados atuantes nas lajes do edifício, os valores foram os recomendados pela norma NBR 6120:1980

TABELA 4.1.1 – CARGAS ATUANTES NAS LAJES

Carregamentos			
Elemento	γ (kN/m ³)	h (cm)	Total (kN/m ²)
Laje em concreto armado	25	-	-
Contra piso	21	3,5	0,735
Reboco	19	2	0,38
Acabamento	18	1	0,18
Parede	13	-	-

O calculo da carga de parede é diferenciado dependendo da direção adotada para as armaduras de flexão e da posição da parede. No caso de lajes bidirecionais a carga de parede é distribuída para toda a laje segue a seguinte expressão:

$$g_{par} = V_{par} * \gamma_{par} / (l_x * l_y)$$

onde:

g_{par} = carregamento permanente por m² devido ao peso próprio da parede

V_{par} = Volume da parede

γ_{par} = Peso específico da parede

Em lajes unidirecionais caso o comprimento da parede esteja na direção do maior vão da laje, como demonstra a figura 4.1.1.

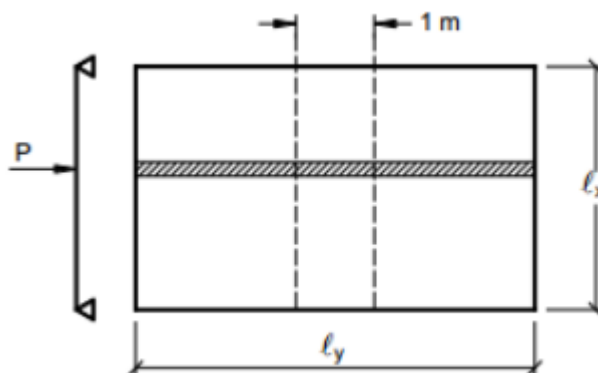


FIGURA 4.1.1 – CARREGAMENTO DE PAREDE NA MAIOR DIREÇÃO DE LAJE UNIDIRECIONAL

FONTE: BASTOS, 2015

A carga de parede será considerada como uma carga pontual na menor direção e segue a seguinte formula:

$$P_{par} = V_{par} * \gamma_{par} / \ell_x$$

Sendo que P_{par} = Carregamento pontual do peso próprio da parede

Em lajes unidirecionais em que o comprimento da parede se encontra na direção do menor vão da laje, como apresentado na figura 4.1.2, a carga da alvenaria deve ser considerada distribuída ao longo do menor vão.

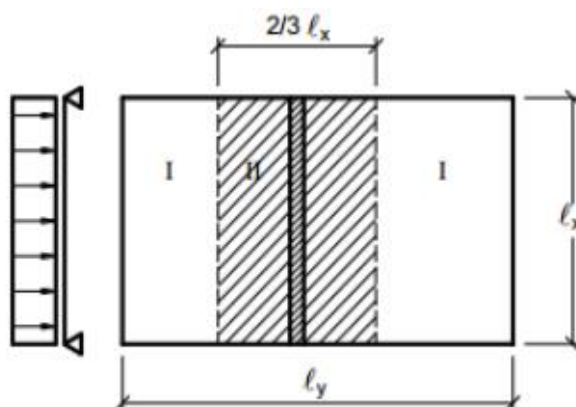


FIGURA 4.1.2 – CARREGAMENTO DE PAREDE NA MENOR DIREÇÃO DE LAJE UNIDIRECIONAL

FONTE: BASTOS, 2015

O carregamento é calculado pela seguinte formula:

$$g_{par} = 3 * V_{par} * \gamma_{par} / (2 * l_x^2)$$

4.1.2 – Cargas Acidentais

Segundo a NBR 6120:1980 a carga acidental (F_q) a ser considerada em lajes de dormitórios, salas, cozinhas e banheiros seria de 1,5 kN/m². No entanto com o objetivo de conseguir valores mais significativos para o estudo apresentado neste trabalho, será considerado uma carga acidental de 2 kN/m² atuante em todas as lajes.

4.1.3 – Combinações

As combinações abaixo foram as consideradas neste trabalho:

- Última: $F_d = \gamma_f * F_g + \gamma_f * F_q$
- Frequente de serviço: $F_d = F_g + \psi_1 * F_q$
- Quase permanentes de serviço: $F_d = F_g + \psi_2 * F_q$

Sendo que $\gamma_f = 1,4$, $\psi_1 = 0,4$ e $\psi_2 = 0,3$, os coeficiente foram extraídos da NBR 6118:2014 para edifícios residenciais.

4.2 – LAJES MACIÇAS

4.2.1 – Generalidades

No pré-dimensionamento realizado no lançamento da estrutura inicialmente foi considerada a altura das lajes como 12 cm, no entanto após o dimensionamento efetuado com planilha eletrônica, percebeu-se que a altura podia ser reduzida com vantagem. Assim, após várias interações com menores alturas, a altura final considerada foi de 8 cm, que é o mínimo definido pela Norma, para todas as lajes do pavimento.

Os cálculos apresentados são o dimensionamento final das lajes do pavimento. O pré-dimensionamento funcionou como ponto de partida para a confecção da planilha, que depois de pronta foi fácil de alterar a espessura das lajes e verificar os resultados para chegar ao melhor dimensionamento.

Na Figura 4.2.1 apresenta-se o pavimento tipo com a vinculação entre as lajes.

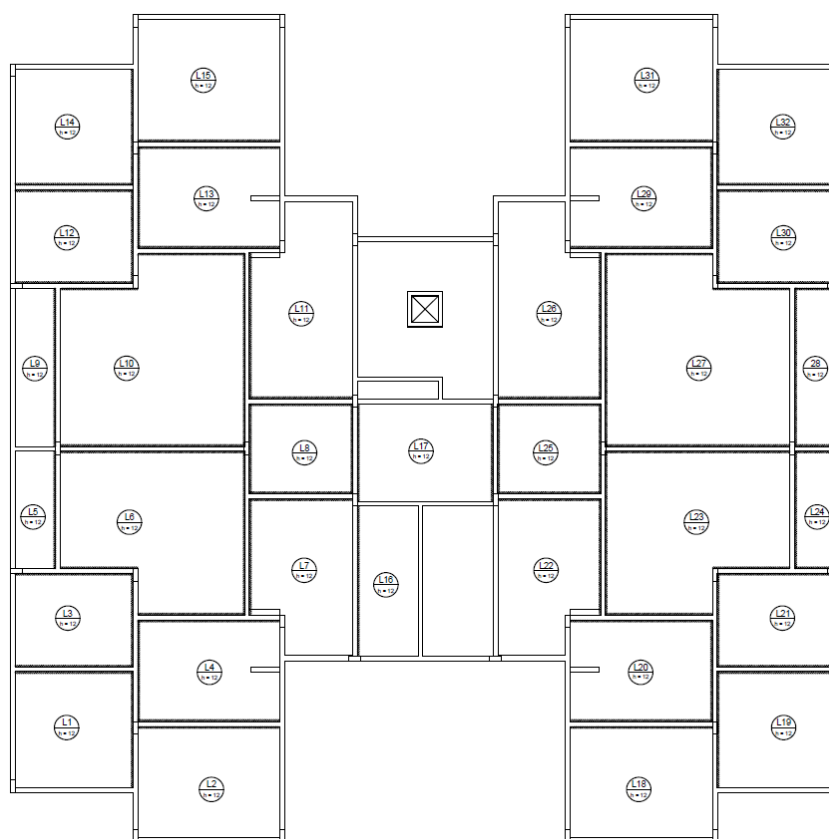


FIGURA 4.2.1 – VINCULAÇÕES DAS LAJES DO PAVIMENTO TIPO

A numeração das lajes foi feita de forma não convencional para melhor agrupar as lajes entre as partes do edifício (apartamentos e hall), assim a numeração segue a ordem de lajes do apartamento tipo 1, apartamento tipo 2 e hall social. Devido às simetrias do pavimento, o dimensionamento das lajes dos apartamentos do lado oeste do pavimento será igual o das lajes dos

apartamentos do lado leste. Assim serão dimensionados apenas as Lajes de numeração 01 e até 17 e a laje 22.

Primeiramente é definido o vão efetivo das lajes que é feito pelo procedimento abaixo, o procedimento também se aplica às vigas:

$$L_{ef} = l_0 + a_1 + a_2$$

$$\text{Onde: } a_1 \leq t_1 / 2 \text{ e } 0,3 * h$$

$$a_2 \leq t_2 / 2 \text{ e } 0,3 * h$$

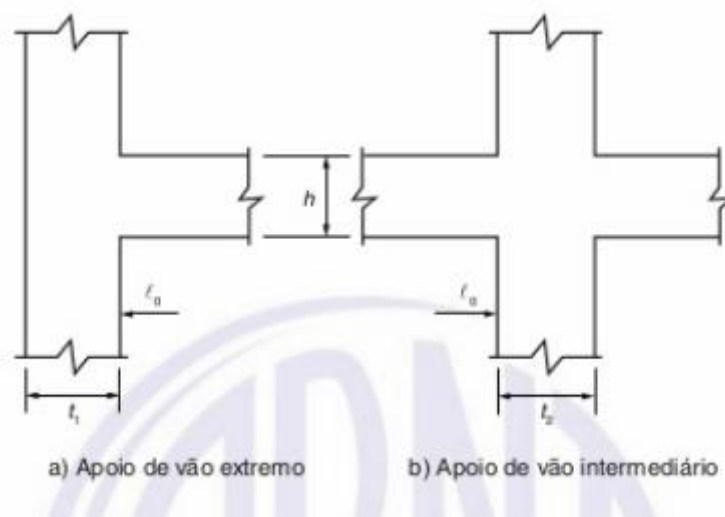


FIGURA 4.2.2 – VÃO EFETIVO

FONTE: NBR 6118:2014 – item 14.6.2.4

Depois dos vãos de cálculo definidos, através da relação entre o menor vão e maior vão das lajes (λ) é definido se a laje será armada em uma direção ou duas direções, assim se o resultado dessa relação for mais ou igual a 2 a laje é unidirecional, e caso a relação for menor que 2 a laje bidirecional.

A tabela abaixo apresenta o resumo das características discutidas anteriormente com os vãos, apoios, altura, vão efetivo e λ

TABELA 4.2.1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS LAJES

Laje -	L_{0x} [cm]	L_{0y} [cm]	apoios [cm]	h [cm]	L_x [cm]	L_y [cm]	λ -
1=19	285	290	12	8	289,8	294,8	1,02
2=18	272	349	12	8	276,8	353,8	1,28
3=21	230,5	290	12	8	235,3	294,8	1,25
4=20	249	349	12	8	253,8	353,8	1,39
5=24	100	289,5	12	8	104,8	294,3	2,81

6=23	403	454	12	8	407,8	458,8	1,13
7	252,5	385	12	8	257,3	389,8	1,51
8=25	221	254	12	8	225,8	258,8	1,15
9=28	100	389,5	12	8	104,8	394,3	3,76
10=27	454	475	12	8	458,8	479,8	1,05
11=26	254	485	12	8	258,8	489,8	1,89
12=30	230,5	290	12	8	235,3	294,8	1,25
13=29	249	349	12	8	253,8	353,8	1,39
14=32	285	290	12	8	289,8	294,8	1,02
15=31	300	349	12	8	304,8	353,8	1,16
16	150	369	12	8	154,8	373,8	2,41
17	240	333	12	8	244,8	337,8	1,38
22	252,5	385	12	8	257,3	389,8	1,51

Portanto, as únicas lajes que serão unidirecionais serão as lajes 5, 9 e 16, as demais serão bidirecionais (de armadura em duas direções).

Como ultima generalidade, para o cálculo das lajes L6 e L10, que possuem a geometria no formato em um pouco diferente de retangular, é considerado sua geometria como retangular nos cálculos, considerando as dimensões dos maiores vãos como definição de sua geometria, o que implica em pequena diferença em relação ao esforço resultante.

4.2.2 – Estado Limite Ultimo

4.2.2.1 – Momentos Fletores

Com as dimensões, vinculações e carregamentos definidos, pode-se determinar os momentos fletores de lajes retangulares utilizando tabelas de BARES (Pinheiro, 2008) para as lajes maciças bidirecionais, como preconiza a NBR 6118:2014.

Esta Tabela utiliza a seguinte fórmula:

$$m = u * p * (L_x)^2 / 100$$

onde: m : momento máximo resultante

u : coeficiente tabelado que varia de acordo com o tipo de vinculação da laje e com qual momento está se desejando.

Lx : menor vão da laje

No entanto, o momento das lajes unidirecionais (L5, L9 e L16) não é calculado pela tabela, para o cálculo dos esforços dessas lajes elas foram modeladas como vigas no software ftool com a mesma altura de sua laje e considerando uma base de 1m. As lajes L5 e L9 tem o mesmo vão efetivo e dimensões, assim os esforços das duas serão a mesma, portanto será mostrado apenas a modelagem da L5 e L16. São utilizadas as expressões clássicas de $X = (p \cdot L^2) / 8$ para os momentos negativos e $M = (p \cdot L^2) / 14,22$ para os momentos positivos para cada caso mostrado.

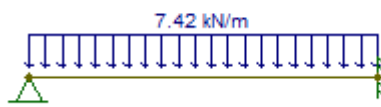


FIGURA 4.2.3 – CARREGAMENTO DE CÁLCULO DE L5

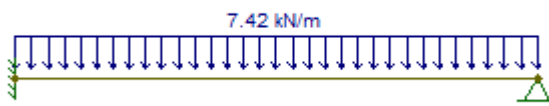


FIGURA 4.2.4 – CARREGAMENTO DE CÁLCULO DE L16

A tabela 4.2.2 apresenta os momentos calculados no ELU, sendo X_x o momento negativo na menor direção e X_y o momento negativo na maior direção da lajes.

TABELA 4.2.2 – MOMENTOS MÁXIMOS DAS LAJES NO ELU

Laje -	caso -	pd [kN/m ²]	mx	m'x	my	m'y	Mx [kNm/m]	Xx [kNm/m]	My [kNm/m]	Xy [kNm/m]
1=19	3	7,42	2,79	7,20	2,75	7,12	1,74	4,49	1,71	4,44
2=18	2B	7,42	4,62	10,14	2,45	0,00	2,63	5,77	1,39	0,00
3=21	5B	7,42	3,26	7,33	1,67	5,69	1,34	3,01	0,69	2,34
4=20	5B	11,26	3,56	7,76	1,48	5,70	2,58	5,63	1,08	4,14
5=24	2B	7,42	-	-	-	-	0,57	1,02	-	-
6=23	5B	7,42	2,94	6,85	1,86	5,65	3,62	8,45	2,30	6,97
7	3	7,42	4,77	10,48	2,21	8,07	2,34	5,15	1,09	3,96
8=25	6	11,01	2,60	6,09	1,92	5,46	1,46	3,42	1,08	3,07
9=28	2B	7,42	-	-	-	-	0,57	1,02	-	-
10=27	5A	7,42	2,25	6,06	2,59	2,25	3,51	9,47	4,05	3,51
11=26	3	7,42	5,55	11,67	1,68	8,19	2,76	5,80	0,84	4,07
12=30	5B	7,42	3,26	7,33	1,67	5,69	1,34	3,01	0,69	2,34
13=29	5B	11,26	3,56	7,76	1,48	5,70	2,58	5,63	1,08	4,14
14=32	3	7,42	2,79	7,20	2,75	7,12	1,74	4,49	1,71	4,44
15=31	2B	7,42	4,22	9,52	2,65	0,00	2,91	6,56	1,83	0,00
16	2B	7,42	-	-	-	-	1,25	2,22	-	-
17	4A	7,42	7,55	0,00	3,79	9,84	3,36	0,00	1,69	4,37
22	3	7,42	4,77	10,48	2,21	8,07	2,34	5,15	1,09	3,96

No entanto é necessário realizar uma compatibilização dos momentos negativos nas vinculações das lajes, para assim considerar apenas um momento atuante na vinculação. Tal compatibilização é feita seguindo a seguinte regra:

$$M_- \geq 0,8 * M_{\text{maior}} \text{ ou Média'}$$

Após a realização da compatibilização, uma correção dos momento positivos deve ser feita pois caso o momento negativo tenha diminuído na compatibilização é natural que com a descida da curva de momento fletor o momento positivo aumente. Tal correção deve ser feita somente se ocorrer aumento do momento fletor positivo. A correção é realizada com as seguintes equações:

- Caso laje de extremidade: $M_{+corr} = (M_{+}) + \Delta M_{a-} / 2$
- Caso laje intermediária: $M_{+corr} = (M_{+}) + | \Delta M_{a-} - \Delta M_{b-} | / 2$

A tabela 4.2.3 apresenta os momentos negativos compatibilizados (Xx' e Yy') e o valor final caso tenha ocorrido a correção dos momento positivos (Mx' e My') todos em kPa/m.

TABELA 4.2.3 MOMENTOS COMPATIBILIZADOS E CORRIGIDOS NO ELU

Laje	Mx	My	Xx1	Xx2	Xy1	Xy2	Xx1'	Xx2'	Xy1'	Xy2'	Mx'	My'
1=19	1,74	1,71	4,49	0	4,44	0	3,75	0	3,55	0	2,11	2,16
2=18	2,63	1,39	5,77	0	0,00	0	5,70	0	3,55	0	2,66	1,39
3=21	1,34	0,69	3,01	3,01	2,34	0	6,76	3,75	1,87	0	1,34	0,92
4=20	2,58	1,08	5,63	5,63	4,14	0	5,70	4,50	3,31	0	3,11	1,49
5=24	0,57	0,00	1,02	0	0,00	0,00	0,81	0	2,41	0,00	0,67	0,00
6=23	3,62	2,30	8,45	0	6,97	0	6,76	6,76	5,57	0,81	3,62	2,59
7	2,34	1,09	5,15	0,00	3,96	0	6,06	4,12	3,69	0	2,34	1,22
8=25	1,46	1,08	3,42	3,42	3,07	3,07	3,74	3,69	3,72	7,57	1,46	1,08
9=28	0,57	0,00	1,02	0	0,00	0,00	0,81	0	2,41	0,00	0,67	0,00
10=27	3,51	4,05	9,47	0	3,51	0	6,76	7,57	7,63	0,81	3,51	4,05
11=26	2,76	0,84	5,80	0	4,07	0	7,63	0	3,74	0	2,76	1,00
12=30	1,34	0,69	3,01	3,01	2,34	0	7,57	3,73	1,87	0	1,34	0,92
13=29	2,58	1,08	5,63	5,63	4,14	0	6,09	4,57	3,31	0	2,88	1,49
14=32	1,74	1,71	4,49	0	4,44	0	3,31	0	3,55	0	2,33	2,16
15=31	2,91	1,83	6,56	0	0,00	0	3,55	0	6,09	0	4,41	1,83
16	1,25	0,00	2,22	0	0,00	0	4,12	0	0,00	0	1,25	0,00
17	3,36	1,69	0,00	0	4,37	4,37	0	0,00	3,72	3,72	3,36	2,34
22	2,34	1,09	5,15	0	3,96	0	6,06	0	3,69	4,50	2,34	1,09

4.2.2.2 – Armadura Positiva de Flexão

O cálculo da armadura de flexão tanto para positiva quanto negativa é realizado utilizando o cálculo da linha neutra, a estimativa da variável “d” foi feita já considerando def que segue as seguintes formulas:

- Direção de maior momento M+: $d = h - (c + 0,5 * \Phi 1)$
- Direção de menor momento M+: $d = h - (c + \Phi 1 + 0,5 * \Phi 2)$
- M- sobre apoio: $d = h - (c + 0,5 * \Phi)$

Considerando que $\Phi 1$ e $\Phi 2$ são as bitolas das armaduras da primeira e segunda camada da laje, respectivamente. As bitolas usadas respeitaram o valor máximo indicado pela NBR 6118:2014, que é calculada pela formula

$$\Phi_{\max} = h_{\text{laje}} / 8 = 80 \text{ mm} / 8 = 10 \text{ mm}$$

Então a altura da linha neutra é obtida pela solução da equação geral:

$$x = 1,25 * d * (1 - \sqrt{1 - M_d / (0,425 * f_{cd} * b_w * d^2)})$$

E é efetuado o cálculo da armadura de aço por metro necessária:

$$A_s = M_d / (f_{yd} * z), \text{ onde } z = d - 0,4 * x$$

Os resultados se encontram a seguir na tabela 4.2.3

TABELA 4.2.3 – CÁLCULO DA ARMADURA POSITIVA NECESSÁRIA

1=19	Bidirecional						
Direção	Md	h	Φ	d	x	x/d	As,cal
-	[kNm/m]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]		[cm ² /m]
Lx	2,11	8,00	0,50	4,75	0,38	0,08	0,88
Ly	2,16	8,00	0,50	5,25	0,35	0,07	0,81
2=18	Bidirecional						
Lx	2,66	8,00	0,50	5,25	0,43	0,08	1,01
Ly	1,39	8,00	0,50	4,75	0,25	0,05	0,57
3=21	Bidirecional						
Lx	1,34	8,00	0,50	5,25	0,21	0,04	0,50
Ly	0,92	8,00	0,50	4,75	0,16	0,03	0,38
4=20	Bidirecional						
Lx	3,11	8,00	0,50	5,25	0,51	0,10	1,18
Ly	1,49	8,00	0,50	4,75	0,26	0,06	0,62
5=24	Unidirecional						
Lx	0,57	8,00	0,50	5,25	0,09	0,02	0,21

6=23	Bidirecional						
Lx	3,62	8,00	0,50	5,25	0,60	0,11	1,39
Ly	2,59	8,00	0,50	4,75	0,47	0,10	1,09
7	Bidirecional						
Lx	2,34	8,00	0,50	5,25	0,38	0,07	0,88
Ly	1,22	8,00	0,50	4,75	0,22	0,05	0,50
8=25	Bidirecional						
Lx	1,46	8,00	0,50	5,25	0,23	0,04	0,54
Ly	1,08	8,00	0,50	4,75	0,19	0,04	0,44
9=28	Unidirecional						
Lx	0,50	8,00	0,50	5,25	0,08	0,02	0,18
10=27	Bidirecional						
Lx	3,51	8,00	0,50	4,75	0,64	0,14	1,50
Ly	4,05	8,00	0,50	5,25	0,67	0,13	1,56
11=26	Bidirecional						
Lx	2,76	8,00	0,50	5,25	0,45	0,09	1,04
Ly	1,00	8,00	0,50	4,75	0,18	0,04	0,41
12=30	Bidirecional						
Lx	1,34	8,00	0,50	5,25	0,21	0,04	0,50
Ly	0,92	8,00	0,50	4,75	0,16	0,03	0,38
13=29	Bidirecional						
Lx	2,88	8,00	0,50	5,25	0,47	0,09	1,09
Ly	1,49	8,00	0,50	4,75	0,26	0,06	0,62
14=32	Bidirecional						
Lx	2,33	8,00	0,50	5,25	0,38	0,07	0,88
Ly	2,16	8,00	0,50	4,75	0,39	0,08	0,90
15=31	Bidirecional						
Lx	4,4	8,0	0,5	5,3	0,7	0,1	1,7
Ly	1,8	8,0	0,5	4,8	0,3	0,1	0,8
16	Unidirecional						
Lx	1,20	8,00	0,50	5,25	0,19	0,04	0,44
17	Bidirecional						
Lx	3,36	8,00	0,50	5,25	0,55	0,10	1,28
Ly	2,34	8,00	0,50	4,75	0,42	0,09	0,98
22	Bidirecional						
Lx	2,34	8,00	0,50	5,25	0,38	0,07	0,88
Ly	1,09	8,00	0,50	4,75	0,19	0,04	0,45

Nota-se que todas as lajes se encontram no domínio II de deformação como indicado pela a relação entre as distâncias do topo da borda da laje até linha neutra (x) e centro geométrico da armadura (d, que foi menor que 0,259 para todas as lajes. Isso se deve ao fato dos pequenos vão do pavimento resultarem pequenos esforços que são facilmente suportados pela laje, o domínio II pode

ser considerado como um indicador que há um excesso de área de concreto e portanto uma menor quantidade de armadura é necessária.

Agora seguindo a norma NBR 6118:2014, é necessário atender a quantidade de aço mínimo que está especificada na tabela 4.2.8, A área aço mínima tem como objetivo garantir que a peça não sofra uma ruptura brusca quando a seção passar do estágio I para o estágio II.

TABELA 4.2.4 – VALORES MÍNIMOS PARA ARMADURAS PASSIVAS ADERENTES

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		—
onde $\rho_s = A_s/b_N h$ e $\rho_p = A_p/b_N h$.			
NOTA Os valores de ρ_{\min} são definidos em 17.3.5.2.1.			

FONTE: NBR 6118:2003 – tabela 19.1

Assim foram usadas as seguintes formulas de armadura mínima:

- Lajes bidirecionais: $0,10 * b_w * h$
- Lajes Unidirecionais: $0,15 * b_w * h$

Além da área de aço mínima, deve ser considerado o espaçamento máximo da armadura que deve respeitar a seguinte condição:

$$s_{\max} = 2 * h \leq 20 \text{ cm}$$

$$\text{portanto } s_{\max} = 2 * 8 \text{ cm} = 16 \text{ cm} \leq 20 \text{ cm}$$

A partir do espaçamento máximo (16 cm) é então calculado a área de aço por metro corresponde ao espaçamento máximo pela formula abaixo

$$A_{s,s\max} = (\pi * \Phi^2 / 4) * (s_{\max} / 100)$$

A armadura final adotada então deve atender todos esses requisitos, sendo maior que a necessária, mínima e de espaçamento máximo. Com isto é calculado o espaçamento efetivo da armadura que é área de aço de uma bitola dividida pela área de aço adotada, a armadura efetiva é calculada seguindo a mesma formula de $A_{s,s\max}$ no entanto agora usando o espaçamento efetivo. A quantidade de barras necessária ao todo da laje é definida dividindo o comprimento da extensão que a armadura está sendo distribuída pela espaçamento efetivo, e por fim o comprimento é determinado somando o vão efetivo à espessura dos apoios menos a dimensão do cobrimento. Tais considerações e cálculos estão presentes na Tabela 4.2.5.

TABELA 4.2.5 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA EFETIVA

1=19	Bidirecional								
Direção -	$A_{s,cal}$ [cm ² /m]	$A_{s,mín}$ [cm ² /m]	s_{\max} [cm]	$A_{s,máx}$ [cm ² /m]	$A_{s,ado}$ [cm ² /m]	$A_{s,ef}$ [cm ² /m]	s [cm]	Q [ud]	Compr [cm]
Lx	0,88	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	19	297
Ly	0,81	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	18	302
2=18	Bidirecional								
Lx	1,01	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	22	284
Ly	0,57	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	17	361
3=21	Bidirecional								
Lx	0,50	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	19	242,5
Ly	0,38	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	15	302
4=20	Bidirecional								
Lx	1,18	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	22	261
Ly	0,62	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	16	361
5=24	Unidirecional								
Lx	0,21	1,20	16	1,23	1,23	1,23	16	19	112
6=23	Bidirecional								
Lx	1,39	0,80	16	1,23	1,39	1,40	14	33	415
Ly	1,09	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	26	466
7	Bidirecional								
Lx	0,88	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	25	264,5
Ly	0,50	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	16	397
8=25	Bidirecional								
Lx	0,54	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	16	233
Ly	0,44	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	14	266

9=28	Unidirecional								
Lx	0,18	1,20	16	1,23	1,23	1,23	16	25	112
10=27	Bidirecional								
Lx	1,50	0,80	16	1,23	1,50	1,51	13	37	466
Ly	1,56	0,80	16	1,23	1,56	1,64	12	38	487
11=26	Bidirecional								
Lx	1,04	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	31	266
Ly	0,41	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	16	497
12=30	Bidirecional								
Lx	0,50	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	19	242,5
Ly	0,38	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	15	302
13=29	Bidirecional								
Lx	1,09	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	22	261
Ly	0,62	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	16	361
14=32	Bidirecional								
Lx	0,88	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	19	297
Ly	0,90	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	18	302
15=31	Bidirecional								
Lx	1,71	0,8	16	1,2	1,7	1,8	11	32	312
Ly	0,76	0,8	16	1,2	1,2	1,2	16	19	361
16	Unidirecional								
Lx	0,44	1,20	16	1,23	1,23	1,23	16	24	162
17	Bidirecional								
Lx	1,28	0,80	16	1,23	1,28	1,31	15	23	252
Ly	0,98	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	15	345
22	Bidirecional								
Lx	0,88	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	25	264,5
Ly	0,45	0,80	16	1,23	1,23	1,23	16	16	397

O fator determinante para a maioria das armaduras acabou sendo o espaçamento máximo, o entanto para algumas lajes mais solicitadas que tem maiores vãos como as lajes L6, L10 e L15 a armadura necessária calculada ainda foi o valor determinante para o dimensionamento da armadura efetiva.

Para as lajes unidirecionais L5, L9 e L16 necessita ser dimensionado a armadura secundária, assim, ela deve ser maior ou igual aos seguintes valores: 20% da armadura principal, 50% da armadura principal mínima e o valor mínimo absoluto do 0,9 cm²/m. A tabela 4.2.6 apresenta este dimensionamento

TABELA 4.2.6 – ARMADURA SECUNDÁRIA DAS LAJES UNIDIRECIONAIS

Laje	-	L5	L9	L16
Armadura Principal / m		1,23	1,23	1,23
20% da armadura Principal / m	cm ²	0,24544	0,2454	0,2454
0,9 cm ² / m	cm ²	0,9	0,9	0,9
As,min/m (principal)	cm ²	1,2	1,2	1,2
0,5*As,min/m (principal)	cm ²	0,6	0,6	0,6
Armadura Secundária/m	cm ²	0,9	0,9	0,9
Bitola (Φ)	cm	0,5	0,5	0,5
Espaçamento calculado	cm	21	21	21
Espaçamento adotado	-	20	20	20
Q		6	6	8
Comp		301,5	401,5	381

4.2.2.3 – Armadura Negativa de Flexão

O cálculo da armadura negativa segue o mesmo processo da armadura positiva, no entanto a bitola das armaduras negativas deve respeitar a dimensão mínima de Φ6,3 por razão construtiva. A tabela 4.2.7 apresenta os resultados do dimensionamento até a armadura de aço adotada que satisfaz as exigências de armadura mínima e espaçamento máximo.

TABELA 4.2.7 – CÁLCULO DA ARMADURA NEGATIVA DE AÇO

L1-L2 / L19-L18										
Md- [kNm/m]	h [cm]	Φ [cm]	d [cm]	x [cm]	x/d -	As,cal [cm ² /m]	As,mín [cm ² /m]	s,máx [cm]	As,máx [cm ² /m]	As,ado [cm ² /m]
3,55	8	0,6	6,19	0,49	0,08	1,36	1,2	16	1,95	1,95
L1-L3 / L19-L21										
3,75	8	0,6	6,19	0,52	0,08	1,44	1,2	16	1,95	1,95
L1-L4 / L19-L20										
4,29	8	0,6	6,19	0,59	0,10	1,66	1,2	16	1,95	1,95
L2-L4 / L18-L20										
5,70	8	0,6	6,19	0,80	0,13	2,23	1,2	16	1,95	2,23
L3-L4 / L21-L20										
3,31	8	0,6	6,19	0,45	0,07	1,27	1,2	16	1,95	1,95
L3-L5 / L21-L24										
2,41	8	0,6	6,19	0,33	0,05	0,92	1,2	16	1,95	1,95
L3-L6 / L21-L23										
6,76	8	0,6	6,19	0,96	0,16	2,68	1,2	16	1,95	2,68
L3-L6 / L21-L23										
1,87	8	0,6	6,19	0,25	0,04	0,71	1,2	16	1,95	1,95

L4-L6 / L20-L23										
7,04	8	0,6	6,19	1,00	0,16	2,80	1,2	16	1,95	2,80
L4-L7 / L20-L22										
4,50	8	0,6	6,19	0,62	0,10	1,75	1,2	16	1,95	1,95
L5-L6 / L24-L23										
0,81	8	0,6	6,19	0,11	0,02	0,31	1,2	16	1,95	1,95
L6-L7 / L23-L22										
6,06	8	0,6	6,19	0,85	0,14	2,38	1,2	16	1,95	2,38
L6-L8 / L23-L25										
5,57	8	0,6	6,19	0,78	0,13	2,18	1,2	16	1,95	2,18
L6-L10 / L23-L27										
6,76	8	0,6	6,19	0,96	0,16	2,68	1,2	16	1,95	2,68
L7-L8 / L22-L25										
3,69	8	0,6	6,19	0,51	0,08	1,42	1,2	16	1,95	1,95
L7-L16										
4,12	8	0,6	6,19	0,57	0,09	1,59	1,2	16	1,95	1,95
L8-L10 / L25-L27										
7,57	8	0,8	6,10	1,10	0,18	3,08	1,2	16	3,14	3,14
L8-L11 / L25-L26										
3,74	8	0,6	6,19	0,52	0,08	1,44	1,2	16	1,95	1,95
L8-L17										
3,72	8	0,6	6,19	0,51	0,08	1,43	1,2	16	1,95	1,95
L9-L10 / L28-L27										
0,81	8	0,6	6,19	0,11	0,02	0,31	1,2	16	1,95	1,95
L9-L12 / L28-L30										
2,41	8	0,6	6,19	0,33	0,05	0,92	1,2	16	1,95	1,95
L10-L11 / L27-L26										
7,63	8	0,8	6,10	1,11	0,18	3,10	1,2	16	3,14	3,14
L10-L12 / L27-L30										
7,57	8	0,8	6,10	1,10	0,18	3,08	1,2	16	3,14	3,14
L10-L12 / L27-L30										
1,87	8	0,6	6,19	0,25	0,04	0,71	1,2	16	1,95	1,95
L10-L13 / L27-L29										
4,57	8	0,6	6,19	0,63	0,10	1,77	1,2	16	1,95	1,95
L11-L13 / L26-L29										
4,50	8	0,6	6,19	0,62	0,10	1,75	1,2	16	1,95	1,95
L12-L13 / L30-L29										
3,31	8	0,6	6,19	0,45	0,07	1,27	1,2	16	1,95	1,95
L12-L14 / L30-L32										
3,73	8	0,6	6,19	0,51	0,08	1,43	1,2	16	1,95	1,95
L13-L14 / L29-L32										
4,29	8	0,6	6,19	0,59	0,10	1,66	1,2	16	1,95	1,95
L13-L15 / L29-L31										
6,09	8	0,8	6,10	0,87	0,14	2,44	1,2	16	3,14	3,14

L14-L15 / L32-L31										
3,55	8	0,6	6,19	0,49	0,08	1,36	1,2	16	1,95	1,95
L17-L25										
3,72	8	0,6	6,19	0,51	0,08	1,43	1,2	16	1,95	1,95

Nota-se que as maiores solicitações estão ocorrendo nos apoios, onde os negativos exigem uma armadura maior do que a necessária para os momentos positivos, assim em alguns dos encontros de laje nota-se que domínio de deformação chega ao domínio III com $x/d > 0,259$, como é caso por exemplo entre a maioria dos apoios da L10.

Em seguida é definida a armadura efetiva assim como nas armaduras positivas, no entanto o comprimento usado para definir o espaçamento efetivo é o comprimento do encontro das lajes em questão (L), assim é determinado a quantidade de barras utilizadas e o comprimento delas foi definido considerando economia de ponta que é calculado considerando o maior L_x entre as lajes em questão na formula abaixo que já adiciona os pés da armadura:

$$\text{Comprimento} = (0,25 * L_x' + 10 * \Phi) + (0,125 * L_x' + 10 * \Phi) + 2 * (h - 2 * c)$$

TABELA 4.2.8 – ARMADURA NEGATIVA DE AÇO EFETIVA

L1-L2 / L19-L18						
As,ado [cm ² /m]	As,ef [cm ² /m]	s [cm]	L [cm]	Q [ud]	lx' [cm]	Comp. [cm]
1,95	1,95	16	150	10	285	125
L1-L3 / L19-L21						
1,95	1,95	16	290	19	285	125
L1-L4 / L19-L20						
1,95	1,95	16	122,5	8	285	125
L2-L4 / L18-L20						
2,23	2,40	13	349	27	272	121
L3-L4 / L21-L20						
1,95	1,95	16	115,5	8	249	112
L3-L5 / L21-L24						
1,95	1,95	16	100	7	230,5	105
L3-L6 / L21-L23						
2,68	2,83	11	179	17	403	170
L3-L6 / L21-L23						
1,95	1,95	16	102,5	7	403	170
L4-L6 / L20-L23						
2,80	2,83	11	264	24	403	170
L4-L7 / L20-L22						
1,95	1,95	16	76	5	252,5	113

L5-L6 / L24-L23						
1,95	1,95	16	289,5	19	403	170
L6-L7 / L23-L22						
2,38	2,40	13	285,5	22	403	170
L6-L8 / L23-L25						
2,18	2,23	14	105	8	403	170
L6-L10 / L23-L27						
2,68	2,83	11	454	42	454	189
L7-L8 / L22-L25						
1,95	1,95	16	254	16	252,5	113
L7-L16						
1,95	1,95	16	369	24	252,5	113
L8-L10 / L25-L27						
3,14	3,14	16	105	7	454	192
L8-L11 / L25-L26						
1,95	1,95	16	254	16	254	114
L8-L17						
1,95	1,95	16	221	14	240	109
L9-L10 / L28-L27						
1,95	1,95	16	389,5	25	454	189
L9-L12 / L28-L30						
1,95	1,95	16	100	7	230,5	105
L10-L11 / L27-L26						
3,14	3,14	16	358,5	23	454	192
L10-L12 / L27-L30						
3,14	3,14	16	179	12	454	192
L10-L12 / L27-L30						
1,95	1,95	16	74,5	5	454	189
L10-L13 / L27-L29						
1,95	1,95	16	264	17	454	189
L11-L13 / L26-L29						
1,95	1,95	16	264	17	254	114
L12-L13 / L30-L29						
1,95	1,95	16	143,5	9	249	112
L12-L14 / L30-L32						
1,95	1,95	16	290	19	285	125
L13-L14 / L29-L32						
1,95	1,95	16	94,5	6	285	125
L13-L15 / L29-L31						
3,14	3,14	16	349	22	300	135
L14-L15 / L32-L31						
1,95	1,95	16	178	12	300	131
L17-L25						
1,95	1,95	16	221	14	240	109

4.2.2.4 – Reações de Apoio

No cálculo das reações de apoio para lajes maciças bidirecionais é considerado a distribuição da carga sugerida pela norma NBR 6118:2014, que é baseada na Teoria das Charneiras Plásticas, em que considera ângulo de 45 graus para apoios do mesmo tipo e 60 graus partindo do apoio engastado se o outro for considerado simplesmente apoiado.

Os índices utilizados serão n_x e n_y para bordas simplesmente apoiadas na direção do menor vão e maior vão, respectivamente, enquanto n'_x e n'_y para as bordas engastadas também respectivamente para menor e maior vão. Assim o cálculo da reação de apoio utiliza a seguinte forma que varia o índice dependendo da vinculação e direção da borda.

$$R_x = n_x * p * L_x / 10$$

Para o caso das lajes unidirecionais podem ser usados os coeficientes indicados na Tabela de reações para $\lambda > 2$.

Então na tabela 4.2.8 obtêm-se os valores das reações de apoios

TABELA 4.2.8 – REAÇÕES DE APOIO

Laje	caso	n_x	n'_x	n_y	n'_y	pd [kN/m ²]	R_x [kN/m]	R'_x [kN/m]	R_y [kN/m]	R'_y [kN/m]
-	-	-	-	-	-					
1=19	3	2,22	3,25	2,17	3,17	7,42	4,78	6,99	4,67	6,82
2=18	2B	3,08	4,51	1,83	0,00	7,42	6,33	9,26	3,76	0,00
3=21	5B	0,00	3,41	1,71	2,50	7,42	0,00	5,96	2,99	4,36
4=20	5B	0,00	3,58	1,71	2,50	11,26	0,00	10,23	4,89	7,14
5=24	2B	4,38	6,25	1,83	0,00	7,42	3,41	4,86	1,42	0,00
6=23	5B	0,00	3,24	1,71	2,50	7,42	0,00	9,81	5,17	7,56
7	3	2,90	4,25	2,17	3,17	7,42	5,54	8,12	4,14	6,05
8=25	6	0,00	2,81	0,00	2,50	11,01	0,00	6,98	0,00	6,22
9=28	2B	4,38	6,25	1,83	0,00	7,42	3,41	4,86	1,42	0,00
10=27	5A	1,78	2,62	0,00	3,08	7,42	6,07	8,90	0,00	10,48
11=26	3	3,19	4,66	2,17	3,17	7,42	6,12	8,96	4,17	6,09
12=30	5B	0,00	3,41	1,71	2,50	7,42	0,00	5,96	2,99	4,36
13=29	5B	0,00	3,58	1,71	2,50	11,26	0,00	10,23	4,89	7,14
14=32	3	2,22	3,25	2,17	3,17	7,42	4,78	6,99	4,67	6,82
15=31	2B	2,96	4,33	1,83	0,00	7,42	6,69	9,79	4,14	0,00
16	2B	4,38	6,25	1,83	0,00	7,42	5,03	7,18	2,10	0,00
17	4A	1,99	0,00	0,00	4,14	7,42	3,61	0,00	0,00	7,52
22	3	2,90	4,25	2,17	3,17	7,42	5,54	8,12	4,14	6,05

4.2.2.5 – Cisalhamento

Mesmo com as lajes estando sujeitas a esforços cortantes não é usual utilizar estribos no seu dimensionamento. Assim, pode-se dispensar o uso da armadura de cisalhamento verificando se o esforço cortante solicitante (V_{sd}) é menor que a capacidade resistente de cálculo do concreto em relação às tensões de tração (V_{rd1}) e de compressão (V_{rd2})

As armaduras de flexão são de ponta a ponta (100% da armadura chega aos apoios), então o valor do índice “k” segue a seguinte formula:

$$K = (1,6 - d) \geq 1$$

Além disso foram considerados os seguintes valores para todas as lajes e ficaram omitidos da tabela:

- $\tau_{rd} = 0,25 * f_{ctd}$, $\inf = 0,32 \text{ MPa}$
- $b(w) = 1\text{m}$
- $N(sd) = 0$
- $A(c) = 0$
- $\sigma(cp) = 0$
- $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$
- $\alpha(v1) = 0,5$

TABELA 4.2.9 – VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CISALHAMENTO

L1 = L19	d	k	A(S1)	p(1)	V(Rd1)	V(Rd2)	V(sd)	Dentro
Reação	[m]	-	[m ² /m]	-	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	dos limites?
R _x	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,78	SIM
R _{x'}	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	6,99	SIM
R _y	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	4,67	SIM
R _{y'}	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	6,82	SIM
L2 = L18								
R _x	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	6,33	SIM
R _{x'}	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	9,26	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	3,76	SIM
L3 = L21								
R _{x'}	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	5,96	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	2,99	SIM
R _{y'}	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,36	SIM

L4 = L20								
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	10,23	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,89	SIM
R _y '	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	7,14	SIM
L5 = L24								
R _x	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	3,41	SIM
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	4,86	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	1,42	SIM
L6 = L23								
R _x '	0,0525	1,5475	1,40E-04	2,67E-03	34,04	210,94	9,81	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	5,17	SIM
R _y '	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	7,56	SIM
L7								
R _x	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	5,54	SIM
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	8,12	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,14	SIM
R _y '	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	6,05	SIM
L8 = L25								
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	6,98	SIM
R _y '	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	6,22	SIM
L9 = L28								
R _x	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	3,41	SIM
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	4,86	SIM
R _y	0,0475	1,5525	9,00E-05	1,89E-03	30,16	190,85	1,42	SIM
L10 = L27								
R _x	0,0475	1,5525	1,51E-04	3,18E-03	31,38	190,85	6,07	SIM
R _x '	0,0475	1,5525	1,51E-04	3,18E-03	31,38	190,85	8,90	SIM
R _y '	0,0525	1,5475	1,64E-04	3,12E-03	34,51	210,94	10,48	SIM
L11 = L26								
R _x	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	6,12	SIM
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	8,96	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,17	SIM
R _y '	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	6,09	SIM
L12 = L30								
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	5,96	SIM
R _y	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	2,99	SIM
R _y '	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,36	SIM
L13 = L29								
R _x '	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	10,23	SIM

Ry	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,89	SIM
Ry'	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	7,14	SIM
L14 = L32								
Rx	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	4,78	SIM
Rx'	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	6,99	SIM
Ry	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,67	SIM
Ry'	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	6,82	SIM
L15 = L31								
Rx	0,0525	1,5475	1,79E-04	3,40E-03	34,80	210,94	6,69	SIM
Rx'	0,0525	1,5475	1,79E-04	3,40E-03	34,80	210,94	9,79	SIM
Ry	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,14	SIM
L16								
Rx	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	5,03	SIM
Rx'	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	7,18	SIM
Ry	0,0475	1,5525	9,00E-05	1,89E-03	30,16	190,85	2,10	SIM
L17								
Rx	0,0525	1,5475	1,31E-04	2,49E-03	33,86	210,94	3,61	SIM
Ry'	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	7,52	SIM
L22								
Rx	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	5,54	SIM
Rx'	0,0525	1,5475	1,23E-04	2,34E-03	33,69	210,94	8,12	SIM
Ry	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	4,14	SIM
Ry'	0,0475	1,5525	1,23E-04	2,58E-03	30,82	190,85	6,05	SIM

Portanto, a armadura de cisalhamento será dispensada para todas as lajes já que os maiores esforços de cisalhamento chegaram apenas a aproximadamente um terço de $V(Rd1)$.

4.2.3 – Estado Limite de Serviço

4.2.3.1 – Verificação da Fissuração

O momento de fissuração depende da seção da laje, portanto neste caso será o mesmo para todas as lajes, seu calculo é executado com a seguinte formula:

$$M_r = \alpha * I_c * f_{ctk} / y_t$$

Sendo que α é utilizado 1,2 para seções em forma T ou duplo T e 1,5 para seções retangulares

TABELA 4.2.10 CÁLCULO DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO

	α	$I(c,I)$	$f(ck,m)$	$h(laje)$	$y(t)$	$M_{r,m}$
Laje	-	$[m^4]$	$[kPa]$	$[m]$	$[m]$	$[kN*m]$
Maciça	1,5	4,27E-05	2565	0,08	0,04	4,10

Na tabela 4.2.10 os momentos da combinação frequente de todos os vão e apoio das lajes serão exibidos e comparados com momento de fissuração, caso algum destes momentos seja maior que o momento de fissuração deverá ser considerada a fissuração na laje

TABELA 4.2.11 – VERIFICAÇÃO DE FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO FREQUENTE

Laje	M_r	$M_{x'}$	$X_{x1'}$	$X_{x2'}$	$M_{y'}$	$X_{y1'}$	$X_{y2'}$	Fissura?
	$[kNm/m]$	$[kNm/m]$	$[kNm/m]$	$[kNm/m]$	$[kNm/m]$	$[kNm/m]$	$[kNm/m]$	
1=19	4,10	1,16	2,07	0,00	1,15	0,00	2,07	Não
2=18	4,10	1,45	3,30	0,00	0,77	1,96	0,00	Não
3=21	4,10	0,74	3,73	2,07	0,38	0,00	2,01	Não
4=20	4,10	1,57	4,04	3,30	0,67	2,48	0,00	Não
5=24	4,10	0,35	0,00	0,40	0,00	0,40	1,33	Não
6=23	4,10	2,78	3,73	4,04	1,32	0,40	3,34	Não
7	4,10	1,29	3,34	0,00	0,60	2,13	2,74	Não
8=25	4,10	0,88	2,16	2,13	0,65	3,08	2,13	Não
9=28	4,10	0,35	0,00	0,40	0,00	1,33	0,40	Não
10=27	4,10	2,97	4,18	4,21	2,24	2,74	3,73	Sim
11=26	4,10	1,52	4,21	0,00	0,46	2,74	2,16	Sim
12=30	4,10	0,74	2,06	1,33	0,38	0,00	2,01	Não
13=29	4,10	1,86	3,52	2,74	0,67	2,48	0,00	Não
14=32	4,10	1,16	0,00	2,06	0,94	0,00	2,48	Não
15=31	4,10	1,65	0,00	3,52	1,01	1,96	0,00	Não
16	4,10	0,60	2,27	0,00	0,00	0,00	0,00	Não
17	4,10	1,85	0,00	0,00	1,21	2,13	2,13	Não
22	4,10	1,29	0,00	3,34	0,60	2,13	2,74	Não

Portanto fica determinado que ocorrerá fissuração apenas nas lajes L10 e L11 e deverá ser realizado o cálculo da abertura de fissuras nestas lajes. Na tabela 4.2.11 é realizado a mesma comparação só que com os momentos para combinação quase permanente.

TABELA 4.2.12 – VERIFICAÇÃO DE FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO QUASE PERMANENTE

Laje	Mr [kNm/m]	Mx' [kNm/m]	Xx1' [kNm/m]	Xx2' [kNm/m]	My' [kNm/m]	Xy1' [kNm/m]	Xy2' [kNm/m]	Fissura?
1=19	4,10	1,11	1,97	0,00	1,09	0,00	1,97	Não
2=18	4,10	1,38	3,17	0,00	0,73	1,86	0,00	Não
3=21	4,10	0,70	3,55	1,97	0,36	0,00	1,95	Não
4=20	4,10	1,52	3,88	3,17	0,66	2,39	0,00	Não
5=24	4,10	0,35	0,00	0,40	0,00	0,40	1,26	Não
6=23	4,10	2,79	3,55	3,55	1,21	0,98	3,18	Não
7,00	4,10	1,23	3,18	0,00	0,57	2,04	2,66	Não
8=25	4,10	0,86	2,07	2,04	0,63	2,93	2,05	Não
9=28	4,10	0,35	0,00	0,40	0,00	1,26	0,40	Não
10=27	4,10	2,82	3,98	4,01	2,13	2,66	3,55	Não
11=26	4,10	1,45	4,01	0,00	0,44	2,66	2,07	Não
12=30	4,10	0,70	1,96	1,26	0,36	0,00	1,95	Não
13=29	4,10	1,82	3,38	2,66	0,66	2,39	0,00	Não
14=32	4,10	1,10	0,00	1,96	0,90	0,00	2,39	Não
15=31	4,10	1,56	0,00	3,38	0,96	1,86	0,00	Não
16,00	4,10	0,60	2,16	0,00	0,00	0,00	0,00	Não
17,00	4,10	1,76	0,00	0,00	1,13	2,05	2,05	Não
22,00	4,10	1,23	0,00	3,18	0,57	2,04	2,66	Não

Portanto é definido que não ocorrerá fissuração em nenhuma das lajes na combinação quase permanente, assim não será necessário considerar o efeito da fissuração nas flechas.

4.2.3.2 – Fissuração

Para o cálculo da abertura de fissuras será necessário calcular o momento de inércia da seção totalmente fissurada no estágio II puro ($I_{c,II}$), e para isso primeiramente deve-se conhecer a posição da linha neutra no estágio II puro. O procedimento utilizado aqui será generalizado para uma seção regular “T”, para evitar a repetição teórica ao aplicar o mesmo processo para as laje nervuras que possuem seção T. Segundo Ghali & Favre (1986)(CHUST, et al., 2005), a posição da linha neutra para uma seção é obtida pela equação abaixo:

$$x_{II} = (-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}) / (2 \cdot a_1)$$

sendo que:

- $a_1 = b_w / 2$
- $a_2 = h_c \cdot (b_f - b_w) + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' + \alpha_e \cdot A_s$

- $a_3 = -d' * (\alpha_e - 1) * A's - d * \alpha_e * A_s - 0,5 * h_c^2 * (b_f - b_w)$
- $\alpha_e = E_s / E_{cs}$
- d' : distancia do centro de gravidade de $A's$ até a borda comprimida do concreto

Para a seção T, b_w é a largura da nervura, h_c é a altura da mesa e b_f a largura da mesa

Aqui no caso da laje maciça, todas as lajes possuem a mesma seção, assim serão utilizadas as seguintes dimensões no calculo da linha neutra:

- $b_w = 1m$
- $h_c = 0$
- $b_f = 1m$

Como os valores de E_s e E_{cs} são fixos para todas as lajes, o valor de α_e também será o mesmo para todos

- $\alpha_e = 210000 \text{ Mpa} / 23800 \text{ Mpa} = 8,8235$

Além disso não existindo armadura dupla são desprezados $A's$ e d' ($A's = d = 0$), e assim na tabela 4.2.12 segue o calculo da linha neutra de $I_{c,II}$

TABELA 4.2.13 – CÁLCULO DA LINHA NEUTRO NO ESTÁDIO DOIS PURO

	a1	A_s	a2	d	a3	X(II) 1	X(II) 2	X(II) ado
L10	[m]	[m ²]	[m ²]	[m]	[m ³]	[m]	[m]	[m]
Vão x	0,5	1,51E-04	1,33E-03	0,0475	-6,33E-05	0,0100	-0,0127	0,0100
Apoio x1	0,5	3,14E-04	2,77E-03	0,0610	-1,69E-04	0,0158	-0,0214	0,0158
Apoio x2	0,5	3,14E-04	2,77E-03	0,0610	-1,69E-04	0,0158	-0,0214	0,0158
Vão y	0,5	1,64E-04	1,44E-03	0,0525	-7,58E-05	0,0110	-0,0138	0,0110
Apoio y1	0,5	1,95E-04	1,72E-03	0,0619	-1,06E-04	0,0130	-0,0164	0,0130
Apoio y2	0,5	2,83E-04	2,50E-03	0,0619	-1,55E-04	0,0153	-0,0203	0,0153
L11								
Vão x	0,5	1,23E-04	1,08E-03	0,0525	-5,68E-05	0,0096	-0,0118	0,0096
Apoio x1	0,5	3,14E-04	2,77E-03	0,0610	-1,69E-04	0,0158	-0,0214	0,0158
Vão y	0,5	1,23E-04	1,08E-03	0,0475	-5,14E-05	0,0091	-0,0113	0,0091
Apoio y1	0,5	1,95E-04	1,72E-03	0,0619	-1,06E-04	0,0130	-0,0164	0,0130
Apoio y2	0,5	1,95E-04	1,72E-03	0,0619	-1,06E-04	0,0130	-0,0164	0,0130

Com a posição da linha neutra calculada, pode-se então determinar o momento de inércia de inércia do estádio dois puro utilizando a seguinte equação que considera que x_{II} se encontra na mesa para seção T e pode ser usada normalmente para o calculo com laje retangular.

$$I_{c,II} = (b_f * x_{II}^3) / 3 + \alpha_e * A_s * (x_{II} - d)^2 + (\alpha_e - 1) * A_s' * (x_{II} - d')^2$$

TABELA 4.2.14 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA NO ESTÁDIO DOIS PURO

	X(II) m	As m²	d m	I(c,II) m⁴
L10				
Vão x	0,0100	1,51E-04	0,048	2,21E-06
Apoio x1	0,0158	3,14E-04	0,061	6,98E-06
Apoio x2	0,0158	3,14E-04	0,061	6,98E-06
Vão y	0,0110	1,64E-04	0,053	2,93E-06
Apoio y1	0,0130	1,95E-04	0,062	4,83E-06
Apoio y2	0,0153	2,83E-04	0,062	6,61E-06
L11				
Vão x	0,0096	1,23E-04	0,053	2,29E-06
Apoio x1	0,0158	3,14E-04	0,061	6,98E-06
Vão y	0,0091	1,23E-04	0,048	1,85E-06
Apoio y1	0,0130	1,95E-04	0,062	4,83E-06
Apoio y2	0,0130	1,95E-04	0,062	4,83E-06

Agora se pode realizar a verificação quanto a abertura de fissuras das lajes, que segue a seguinte formula:

$$w1 = (\Phi_i * \sigma(s_i) * 3 * \sigma(s_i)) / (12,5 * \eta_i * E_{si} * f_{ctk,m})$$

$$w \leq$$

$$w2 = (4 / p_{ri} + 45) * (\Phi_i * \sigma(s_i)) / (12,5 * \eta_i * E_{si})$$

Onde:

- Φ_i : Diâmetro da barra que protege a região de envolvimento considerada
- $\sigma(s_i)$: Tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no Estádio II
- η_i : Coeficiente de conformação superficial da armadura passiva considerada, barras nervuradas $\eta_i = 2,25$
- E_{si} : módulo de elasticidade do aço da barra Φ_i
- $f_{ctk,m}$: resistência característica média à tração do concreto aos 28 dias
- p_{ri} : taxa de armadura relação à área da região de envolvimento (A_{cr})
- A_{cr} : Área retangular de concreto protegida pelo aço

A_{cr} considerada terá seu perímetro composto por D_{x1} , D_{x2} e D_{y1} D_{y2} , sendo que todas as dimensões devem ser menor ou iguais a $7,5 * \Phi_i$. Além disso, $D_{x1} = D_{x2}$ e sua dimensão deverá também ser menor ou igual a metade do espaçamento horizontal (s) adotado, D_{y1} deverá ter a dimensão menor ou igual a distancia do centro da armadura até a linha neutra no estádio II e D_{y2}

deve ser menor ou igual a distância do centro de armadura até a borda inferior da laje. Assim

$$A_{cr} = (D_{x1} + D_{x2}) * (D_{y1} + D_{y2})$$

$\sigma(s_i)$ será calcula pela expressão abaixo (CHUST, et al. 2005)

$$\sigma(s_i) = M_{d,frequente} * y_{si} * \alpha_e / I_{c,II}$$

Os valores de η_i , E_{si} e $f_{ctk,m}$ são os mesmo para todas as lajes e serão utilizados os seguintes valores:

- $\eta_i = 2,25$
- $E_{si} = 210000000 \text{ kPa}$
- $F_{ctk,m} = 2565 \text{ kPa}$

A tabela 4.2.15 consta os dados específicos de todas as lajes que serão utilizados no cálculo da abertura de fissuração

TABELA 4.2.15 – DADOS INICIAIS PARA CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAS

Laje L10	Md (freq) [kNm/m]	I(c,II) [m ⁴]	d [m]	d" [m]	x(II) [m]	y(s _i) [m]	$\sigma(s_i)$ [kPa]	Φ_i [m]	s [m]
Vão x	2,97	2,21E-06	0,0475	0,0325	0,0100	0,0375	4,45E+05	0,005	0,13
Apoio x1	4,18	6,98E-06	0,0610	0,0190	0,0158	0,0452	2,39E+05	0,0080	0,16
Apoio x2	4,21	6,98E-06	0,0610	0,0190	0,0158	0,0452	2,41E+05	0,008	0,16
Vão y	2,24	2,93E-06	0,0525	0,0275	0,0110	0,0415	2,80E+05	0,005	0,12
Apoio y1	2,74	4,83E-06	0,0619	0,0182	0,0130	0,0489	2,44E+05	0,0063	0,16
Apoio y2	3,73	6,61E-06	0,0619	0,0182	0,0153	0,0466	2,32E+05	0,0063	0,11
L11									
Vão x	1,52	2,29E-06	0,0525	0,0275	0,0096	0,0429	2,52E+05	0,005	0,16
Apoio x1	4,21	6,98E-06	0,0610	0,0190	0,0158	0,0452	2,41E+05	0,008	0,16
Vão y	0,46	1,85E-06	0,0475	0,0325	0,0091	0,0384	8,46E+04	0,005	0,16
Apoio y1	2,74	4,83E-06	0,0619	0,0182	0,0130	0,0489	2,44E+05	0,0063	0,16
Apoio y2	2,16	4,83E-06	0,0619	0,0182	0,0130	0,0489	1,93E+05	0,0063	0,16

Com estes dados então se pode calcular área de concreto protegida pelo aço e a taxa de armadura da região envolvida

TABELA 4.2.16 – AREA DE CONCRETO E TAXA DE ARMADURA DA REGIÃO ENVOLVIDA

Laje L10	D(x1) [m]	D(x2) [m]	D(y1) [m]	D(y2) [m]	As (un.) [m ²]	A(cr) [m ²]	p(r _i) -
Vão x	0,0375	0,0375	0,0375	0,0325	1,96E-05	5,25E-03	0,0037
Apoio x1	0,0600	0,0600	0,0452	0,0190	5,02E-05	7,70E-03	0,0065
Apoio x2	0,0600	0,0600	0,0452	0,0190	5,02E-05	7,70E-03	0,0065
Vão y	0,0375	0,0375	0,0375	0,0275	1,96E-05	4,88E-03	0,0040

Apoio y1	0,0473	0,0473	0,0473	0,0182	3,12E-05	6,18E-03	0,0050
Apoio y2	0,0473	0,0473	0,0466	0,0182	3,12E-05	6,12E-03	0,0051
L11							
Vão x	0,0375	0,0375	0,0375	0,0275	1,96E-05	4,88E-03	0,0040
Apoio x1	0,0600	0,0600	0,0452	0,0190	5,02E-05	7,70E-03	0,0065
Vão y	0,0375	0,0375	0,0375	0,0325	1,96E-05	5,25E-03	0,0037
Apoio y1	0,0473	0,0473	0,0473	0,0182	3,12E-05	6,18E-03	0,0050
Apoio y2	0,0473	0,0473	0,0473	0,0182	3,12E-05	6,18E-03	0,0050

Por fim, pode-se calcular os valores de w_1 e w_2 e adotar o menor valor entre eles para verificar se ele ultrapassa o valor absoluto aceitável de abertura de fissuras

TABELA 4.2.17 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DAS LAJES

Laje	w(1)	w(2)	w	w(limite)	Dentro do limite?
L10	[m]	[m]	[mm]	[mm]	
Vão x	1,96E-04	4,20E-04	0,196	0,3	OK
Apoio x1	9,03E-05	2,13E-04	0,090	0,3	OK
Apoio x2	9,17E-05	2,14E-04	0,092	0,3	OK
Vão y	7,74E-05	2,46E-04	0,077	0,3	OK
Apoio y1	7,43E-05	2,18E-04	0,074	0,3	OK
Apoio y2	6,72E-05	2,06E-04	0,067	0,3	OK
L11					
Vão x	6,28E-05	2,21E-04	0,063	0,3	OK
Apoio x1	9,17E-05	2,14E-04	0,092	0,3	OK
Vão y	7,09E-06	7,99E-05	0,007	0,3	OK
Apoio y1	7,43E-05	2,18E-04	0,074	0,3	OK
Apoio y2	4,62E-05	1,72E-04	0,046	0,3	OK

4.2.3.3 – Flecha

A flecha é calculada em função do carregamento quase permanente de serviço e recebe contribuição da deformação elástica, fissuração e fluência. No entanto, como foi verificado que não ocorre fissuração no carregamento quase permanente de serviço, pode-se descartar a contribuição da fissuração e utilizar a formula abaixo para flecha elástica:

$$f_{elástica} = (p * l_x^4 * \alpha) / (Ecs * h^3 * 100)$$

Onde:

- $f_{elástica}$: Flecha elástica
- p : carga distribuída devido combinação quase permanente
- l_x : menor vão da laje

- α : coeficiente obtido da tabela 7.2 do livro (CHUST, et al., 2005)
- E_{cs} : Módulo de elasticidade do concreto seco
- h : altura da laje

Esta formula será utilizada para as lajes maciças bidirecionais, o calculo da flecha elástica das lajes maciça unidirecional obtida através do uso da seguinte formula:

$$f = 2,08 * p * L^4 / (384 * E * I)$$

TABELA 4.2.18 – CÁLCULO DA FLECHA ELÁSTICA PARA LAJES BIDIRECIONAIS

Laje	p [kN/m²]	L [m]	α -	E_{cs} [kPa]	h_{eq} [m]	f(elástica+fissuração) [m]
L1	3,90	2,90	2,47	2,38E+07	0,08	5,57E-04
L2	3,90	2,77	4,27	2,38E+07	0,08	8,01E-04
L3	3,90	2,35	2,37	2,38E+07	0,08	2,32E-04
L4	6,64	2,54	2,54	2,38E+07	0,08	5,74E-04
L6	3,90	4,08	2,09	2,38E+07	0,08	1,84E-03
L7	3,90	2,57	4,46	2,38E+07	0,08	6,25E-04
L8	6,46	2,26	1,90	2,38E+07	0,08	2,62E-04
L10	3,90	4,59	2,08	2,38E+07	0,08	2,95E-03
L11	3,90	2,59	5,26	2,38E+07	0,08	7,54E-04
L12	3,90	2,35	2,37	2,38E+07	0,08	2,32E-04
L13	6,64	2,54	2,54	2,38E+07	0,08	5,74E-04
L14	3,90	2,90	2,47	2,38E+07	0,08	5,57E-04
L15	3,90	3,05	3,89	2,38E+07	0,08	1,07E-03
L17	3,90	2,45	5,03	2,38E+07	0,08	5,78E-04
L22	3,90	2,57	4,46	2,38E+07	0,08	6,25E-04

TABELA 4.2.19 – CÁLCULO DA FLECHA ELÁSTICA PARA LAJES UNIDIRECIONAIS

Lajes	p [kN/m²]	L [m]	E_{cs} [kPa]	I [m ⁴]	f(elástica) [m]	f(elástica) [mm]
L5	3,90	1,05	2,38E+07	4,27E-05	2,51E-05	0,03
L9	3,90	1,05	2,38E+07	4,27E-05	2,51E-05	0,03
L16	3,90	1,55	2,38E+07	4,27E-05	1,19E-04	0,12

A contribuição da fluência será calculada usando a seguinte formula:

$$F_{fluência} = f_{elástica} * \alpha f$$

$$\alpha f = (\xi(t) - \xi(t_0)) / (1 + 50 * p')$$

O tempo de retirada de escoramento (t_0) será o mesmo para todas as lajes, e será considerado o tempo final tendendo ao infinito, e p' será desconsiderado pois não há armadura de compressão. Assim, o valor αf será o mesmo para todas as lajes.

- $t_0 = 0,5$ mês
- $\xi(t_0) = 0,68 * 0,996^{0,5} = 0,678$
- $\xi(t) = 2$ para o tempo tendendo ao infinito
- $\alpha f = 1,321$

Com αf determinado o cálculo da flecha considerando deformação elástica e fluência segue na tabela 4.2.19

TABELA 4.2.20 CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À FLUÊNCIA

Laje	αf -	f(elást) m	f(fluência) m	f(elas+flu) m	f(elas+flu) mm	Limite: L/250 mm
L1	1,32	5,57E-04	7,36E-04	1,29E-03	1,29	11,59
L2	1,32	8,01E-04	1,06E-03	1,86E-03	1,86	11,07
L3	1,32	2,32E-04	3,07E-04	5,39E-04	0,54	9,41
L4	1,32	5,74E-04	7,58E-04	1,33E-03	1,33	10,15
L5	1,32	2,51E-05	2,64E-05	4,64E-05	0,05	4,19
L6	1,32	1,84E-03	2,44E-03	4,28E-03	4,28	16,31
L7	1,32	6,25E-04	8,26E-04	1,45E-03	1,45	10,29
L8	1,32	2,62E-04	3,46E-04	6,08E-04	0,61	9,03
L9	1,32	2,51E-05	2,64E-05	4,64E-05	0,05	4,19
L10	1,32	2,95E-03	3,89E-03	6,84E-03	6,84	18,35
L11	1,32	7,54E-04	9,96E-04	1,75E-03	1,75	10,35
L12	1,32	2,32E-04	3,07E-04	5,39E-04	0,54	9,41
L13	1,32	5,74E-04	7,58E-04	1,33E-03	1,33	10,15
L14	1,32	5,57E-04	7,36E-04	1,29E-03	1,29	11,59
L15	1,32	1,07E-03	1,42E-03	2,49E-03	2,49	12,19
L16	1,32	1,19E-04	1,32E-04	2,32E-04	0,23	6,19
L17	1,32	5,78E-04	7,64E-04	1,34E-03	1,34	9,79
L22	1,32	6,25E-04	8,26E-04	1,45E-03	1,45	10,29

Portanto nota-se que mesmo com uma seção da laje de pequena altura ainda há folga considerável em relação ao limite aceitável de deformação. Isto em conjunto as outras folgas causadas pelo baixo carregamento que os pavimento causa, pode indicar que a solução de laje maciça não seja a alternativa mais econômica para este caso.

No entanto ainda é necessário realizar a verificação que flecha devido a aplicação da carga variável não ultrapasse o limite $L / 350$, esta verificação é exigida pela NBR 6118:2014 para garantir que o carregamento não provoque vibração indesejável.

Na tabela 4.2.20 é recalculado a flecha como realizado na tabela 4.2.18, mas considerando agora o carregamento como apenas a carga vertical de uso. As flechas das lajes unidirecionais já estão incluídas na tabela

TABELA 4.2.21 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À CARGA VERTICAL DE USO

Laje	p [kN/m ²]	L [m]	α -	Ecs [kPa]	h [m]	f(vibração) [mm]	Limite: L/350 [mm]
L1	2,00	2,90	2,47	2,38E+07	0,08	0,29	8,28
L2	2,00	2,77	4,27	2,38E+07	0,08	0,41	7,91
L3	2,00	2,35	2,37	2,38E+07	0,08	0,12	6,72
L4	2,00	2,54	2,54	2,38E+07	0,08	0,17	7,25
L5	2,00	1,05	-	2,38E+07	0,08	0,01	2,99
L6	2,00	4,08	2,09	2,38E+07	0,08	0,95	11,65
L7	2,00	2,57	4,46	2,38E+07	0,08	0,32	7,35
L8	2,00	2,26	1,90	2,38E+07	0,08	0,08	6,45
L9	2,00	1,05	-	2,38E+07	0,08	0,01	2,99
L10	2,00	4,59	2,08	2,38E+07	0,08	1,51	13,11
L11	2,00	2,59	5,26	2,38E+07	0,08	0,39	7,39
L12	2,00	2,35	2,37	2,38E+07	0,08	0,12	6,72
L13	2,00	2,54	2,54	2,38E+07	0,08	0,17	7,25
L14	2,00	2,90	2,47	2,38E+07	0,08	0,29	8,28
L15	2,00	3,05	3,89	2,38E+07	0,08	0,55	8,71
L16	2,00	1,55	-	2,38E+07	0,08	0,06	4,42
L17	2,00	2,45	5,03	2,38E+07	0,08	0,30	6,99
L22	2,00	2,57	4,46	2,38E+07	0,08	0,32	7,35

4.2.4 – Quantitativo e Custos dos Materiais

Como já foi determinado o comprimento de aço utilizado nas armaduras e o volume de concreto consumido é facilmente determinado, será realizado uma simples estimativa de custo para realizar uma comparação entre as alternativas estudadas.

O volume de concreto para as lajes maciças considerando as lajes de todo o pavimento o volume é de 25,28 m³ O peso de aço utilizado nas lajes maciças considerando as lajes de todo o pavimento o peso é de 1648,59 kg. As tabelas a seguir apresenta o consumo e custo total para cada material

TABELA 4.2.22 – CUSTOS DOS MATERIAIS

Produto	Custo unitário	Consumo	Custo (R\$)
Concreto 25MPa	320,37	25,28	8100,36
Aço CA-50	4,63	1648,59	7632,97
Custo total			15733,32

4.3 – LAJE NERVURADA BIDIRECIONAL

4.3.1 – Generalidades

Aqui serão dimensionadas as lajes nervuradas com a utilização de blocos de EPS como material inerte, o uso de EPS foi adotado devido a sua conveniência de poder ser usado nas dimensões que preferir. As lajes L5, L9 e L16 não serão dimensionadas aqui, pois serão consideradas como lajes unidirecionais bi apoiadas que serão calculadas posteriormente. Com o auxílio da planilha eletrônica foi definido que apenas um tipo de seção seria suficiente para todo o pavimento, a tabela 4.3.1 abaixo apresenta as características da seção.

TABELA 4.3.1 – CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DA NERVURA

Seção	-	1
Marca/tipo	-	EPS
ie=bf	m	0,65
bn (mínimo)	m	0,04
bn=bw	m	0,08
he	m	0,05
be = a = lo	m	0,57
Área da nervura (sem considerar a capa)	m ²	0,004
Área do material Inerte	m ²	0,0285
hc,mínimo (devido ie)	m	0,038
hc, mínimo (absoluto)	m	0,04
hc=hf	m	0,05
ht	m	0,1
Ac	m ²	0,0365
Ac/m	m ²	0,06083333
ycg	m	0,03047945
Ic,I	m ⁴	1,6508E-05

Abaixo se encontra o desenho da seção com suas devidas medidas em centímetro.

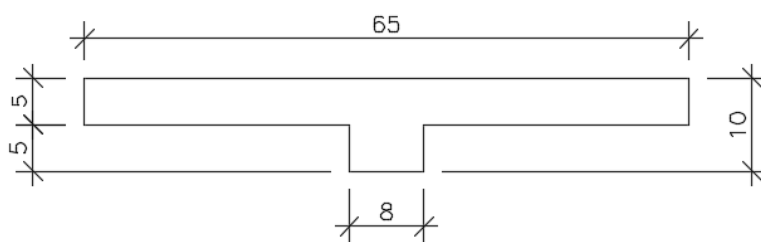


FIGURA 4.3.1 – SEÇÃO 1 LAJE NERVURADA BIDIRECIONAL

Como indica na tabela 4.3.1 a espessura da mesa do concreto (h_c) foi considerada 5 cm para criar uma comparação mais justa a alternativa de lajes nervuradas com cubetas que o fabricante indica a espessura e 5 cm, assim esta dimensão cumpre o critério mínimo de h_c menor ou igual a $i_e/15$ e ao valor absoluto de 4 cm que considera tubulação horizontais embutidas de $\Phi \leq 12,5$ mm. A espessura da nervura (h_n) foi considerada de 8 cm, respeitando as exigências de $h_n \geq 5$ cm. Foram utilizados blocos de EPS de dimensão 57 cm x 57 cm x 5 cm, cumprindo assim o limite de ≤ 65 cm para a distância entre eixos das nervuras (i_e) que dispensa a verificação da flexão da mesa e a verificação de cisalhamento da região das nervuras pode ser efetuado considerando os critérios de laje, a largura colaborante da mesa (b_f) foi considerado o mesmo valor da distância entre eixos das nervuras (i_e). A figura 4.3.1 abaixo demonstra essas dimensões em uma seção genérica de laje nervurada.

Devido as mudança da altura total ($h_t = 10$ cm) em relação a utilizada na laje maciça, é necessário recalcular o vão efetivo das lajes seguindo os mesmos procedimentos seguidos na laje maciça.

TABELA 4.3.2 – CÁLCULO DO VÃO EFETIVO

Laje -	L0x [cm]	L0y [cm]	apoios [cm]	ht [cm]	Lx [cm]	Ly [cm]	λ -
1=19	285	290	12	10	291	296	1,02
2=18	272	349	12	10	278	355	1,28
3=21	230,5	290	12	10	236,5	296	1,25
4=20	249	349	12	10	255	355	1,39
6=23	403	454	12	10	409	460	1,12
7	252,5	385	12	10	258,5	391	1,51
8=25	221	254	12	10	227	260	1,15
10=27	454	475	12	10	460	481	1,05
11=26	254	485	12	10	260	491	1,89
12=30	230,5	290	12	10	236,5	296	1,25
13=29	249	349	12	10	255	355	1,39
14=32	285	290	12	10	291	296	1,02
15=31	300	349	12	10	306	355	1,16
17	240	333	12	10	246	339	1,38
22	252,5	385	12	10	258,5	391	1,51

Com os valores dos vão efetivos pode-se determinar o número de nervuras em cada direção, utilizando a seguinte formula e arredondando o para o valor inteiro inferior.

$$N_{nx} = L_y / i_{ey} \quad N_{ny} = L_x / i_{ex}$$

Possuindo a quantidade de nervura em cada sentido pode-se agora já calcular o volume das nervuras sem considerar a capa (V_n) e o volume que material inerte ocupa (V_e).

$$V_n = N_{nx} * h_e * b_n * L_y + N_{ny} * h_e * b_n * L_x - N_{nx} * N_{ny} * h_e * b_n^2$$

$$V_e = L_y * L_x * h_e - V_n$$

TABELA 4.3.3 – CÁLCULO DO NUMERO DE NERVURAS E VOLUME DAS NERVURAS

Laje	Lx [m]	Ly [m]	ie _x [m]	ie _y [m]	N _{nx} -	N _{ny} -	b _n [m]	h _e [m]	V _n [m³]	V _e [m³]
1=19	2,91	2,96	0,65	0,65	4	4	0,08	0,05	0,09	0,34
2=18	2,78	3,55	0,65	0,65	5	4	0,08	0,05	0,11	0,38
3=21	2,37	2,96	0,65	0,65	4	3	0,08	0,05	0,07	0,28
4=20	2,55	3,55	0,65	0,65	5	3	0,08	0,05	0,10	0,36
6=23	4,09	4,60	0,65	0,65	7	6	0,08	0,05	0,21	0,73
7	2,59	3,91	0,65	0,65	6	3	0,08	0,05	0,12	0,39
8=25	2,27	2,60	0,65	0,65	4	3	0,08	0,05	0,07	0,23
10=27	4,60	4,81	0,65	0,65	7	7	0,08	0,05	0,25	0,86
11=26	2,60	4,91	0,65	0,65	7	4	0,08	0,05	0,17	0,47
12=30	2,37	2,96	0,65	0,65	4	3	0,08	0,05	0,07	0,28
13=29	2,55	3,55	0,65	0,65	5	3	0,08	0,05	0,10	0,36
14=32	2,91	2,96	0,65	0,65	4	4	0,08	0,05	0,09	0,34
15=31	3,06	3,55	0,65	0,65	5	4	0,08	0,05	0,11	0,43
17	2,46	3,39	0,65	0,65	5	3	0,08	0,05	0,09	0,32
22	2,59	3,91	0,65	0,65	6	3	0,08	0,05	0,12	0,39

Assim, pode-se calcular agora o peso próprio da laje nervurada atuante sobre toda a área da laje, para isto basta multiplicar o volume de nervura (V_n) pela densidade do concreto para obter o peso da nervura (P_n), que será dividido pela área da laje e obtido o valor distribuído do peso da nervura (p_n). Este valor então é somado pelo peso distribuído da mesa de concreto que é calculo multiplicando a espessura da mesa (h_c) pela densidade de concreto e assim se consegue o peso próprio total da laje nervurada atuante sobre a laje p (p_{pp}).

TABELA 4.3.4 – CÁLCULO DO PESO PRÓPRIO DISTRIBUIDO NA LAJE

laje	V _n [m³]	D _n [kN/m³]	P _n [kN]	p _n [kN/m²]	p(lmesa) [kN/m²]	p (pp) [kN/m²]
1=19	0,09	25	0,03	0,004	1,25	1,254
2=18	0,11	25	0,04	0,004	1,25	1,254
3=21	0,07	25	0,02	0,003	1,25	1,253

4=20	0,10	25	0,03	0,004	1,25	1,254
6=23	0,21	25	0,16	0,008	1,25	1,258
7	0,12	25	0,05	0,005	1,25	1,255
8=25	0,07	25	0,01	0,003	1,25	1,253
10=27	0,25	25	0,21	0,010	1,25	1,260
11=26	0,17	25	0,08	0,006	1,25	1,256
12=30	0,07	25	0,02	0,003	1,25	1,253
13=29	0,10	25	0,03	0,004	1,25	1,254
14=32	0,09	25	0,03	0,004	1,25	1,254
15=31	0,11	25	0,05	0,004	1,25	1,254
17	0,09	25	0,03	0,004	1,25	1,254
22	0,12	25	0,05	0,005	1,25	1,255

A carga de peso próprio pode ser então ser somada as outras cargas permanentes definidas anteriormente e será iniciado o dimensionamento no estado limite ultimo.

4.3.2 – Estado Limite Último

4.3.2.1 – Momentos Fletores

Os esforços das lajes nervuradas calculados neste trabalho foram obtidos através do uso das tabelas de lajes maciças, assim não será considerado a falta de rigidez à torção da seção bruta das nervuras, portanto os valores de momento fletor, esforço cortante e deformação exibidos neste trabalho são menores que os obtidos por um cálculo que considera a falta de rigidez. Num projeto real é recomendado utilizar a analogia de grelha para o cálculo dos esforços da laje nervurada.

Considerando assim as mesmas vinculações utilizadas na lajes maciças, é realizado o mesmo calculo para obter os momentos fletores máximos que foi utilizado na maciça utilizando agora a altura total da laje nervurada ($h_t = 10 \text{ cm}$). Após isso os mesmos procedimentos de compatibilização de momento negativo e correção de momentos positivos são realizados, para evitar a repetição desse processo a tabela 4.3.5 já apresenta as carga da combinação ultima e os valores finais dos momentos fletores no ELU a serem considerados

TABELA 4.3.5 – CARGAS E MOMENTOS FLETORES FINAIS DEVIDO COMBINAÇÃO ÚLTIMA

Laje	Caso	pd	Mx'	Xx1'	Xx2'	My'	Xy1'	Xy2'
-	-	[kN/m] ²	[kNm/m]	[kNm/m]	[kNm/m]	[kNm/m]	[kNm/m]	[kNm/m]
1=19	3	6,37	1,82	3,25	0,00	1,87	3,07	0,00
2=18	2B	6,37	2,27	5,07	0,00	1,21	3,07	0,00

3=21	5B	6,37	1,16	5,84	3,25	0,80	1,62	0,00
4=20	5B	10,21	2,92	5,07	4,12	1,37	3,03	0,00
6=23	5B	6,37	3,13	5,84	5,84	2,59	4,82	0,00
7	3	6,37	2,03	5,24	0,00	1,02	3,28	0,00
8=25	6	9,96	1,33	3,33	3,28	0,98	3,29	6,54
10=27	5A	6,38	3,03	5,84	6,54	3,50	6,60	0,00
11=26	3	6,37	2,39	6,60	0,00	0,83	3,33	0,00
12=30	5B	6,37	1,16	6,54	3,23	0,80	1,62	0,00
13=29	5B	10,21	2,75	5,41	4,12	1,37	3,03	0,00
14=32	3	6,37	1,93	3,03	0,00	1,87	3,07	0,00
15=31	2B	6,37	3,81	3,07	0,00	1,58	5,41	0,00
17	4A	6,37	2,90	0,00	0,00	1,95	3,29	3,29
22	3	6,37	2,03	5,24	0,00	0,94	3,28	4,12

4.3.2.2 – Armadura Positiva de Flexão

O cálculo da área de aço necessário será feito considerando agora a área por nervura, assim os momentos obtidos kNm/m serão multiplicados pelo comprimento de influência da nervura (bf) e será obtido o valor do momento por nervura kNm/nerv. Junto com cálculo da armadura de aço necessária, será verificado se os momentos de flexão são maiores que o momento que a mesa da seção T consegue resistir sem a contribuição do concreto restante. O cálculo do momento resistente da mesada seção T é obtido pela seguinte formula:

$$M_{rd,m} = 0,85 * f_{cd} * b_f * h_c * (d - h_c / 2)$$

Assim, caso o momento M_d seja menor $M_{rd,m}$ é permitido tratar a seção com retangular para o ELU. A tabela 4.3.6 apresenta o $M_{rd,m}$ para as nervuras junto com o cálculo da área de aço necessária caso $M_d/nerv < M_{rd,m}$

TABELA 4.3.6 – CÁLCULO DA ARMADURA POSITIVA NECESSÁRIA

1=19	Bidirecional							
Vão -	M_d [kNm/n]	$M_{R,m}$ [kNm/n]	h [cm]	Φ [cm]	d [cm]	x [cm]	x/d -	$A_{s,cal}$ [cm²/n]
Lx	1,19	23,43	10	0,50	7,25	0,21	0,03	0,32
Ly	1,21	20,97	10	0,50	6,75	0,23	0,03	0,35
2=18	Bidirecional							
Lx	1,48	23,11	10	0,63	7,19	0,26	0,04	0,48
Ly	0,78	20,32	10	0,50	6,62	0,15	0,02	0,23
3=21	Bidirecional							
Lx	0,75	23,43	10	0,50	7,25	0,13	0,02	0,20
Ly	0,52	20,97	10	0,50	6,75	0,10	0,01	0,15

4=20	Bidirecional							
Lx	1,90	23,11	10	0,63	7,19	0,34	0,05	0,52
Ly	0,89	20,32	10	0,50	6,62	0,17	0,03	0,26
6=23	Bidirecional							
Lx	2,04	23,11	10	0,63	7,19	0,37	0,05	0,55
Ly	1,68	20,00	10	0,63	6,56	0,33	0,05	0,60
7	Bidirecional							
Lx	1,32	23,43	10	0,50	7,25	0,23	0,03	0,35
Ly	0,66	20,97	10	0,50	6,75	0,13	0,02	0,19
8=25	Bidirecional							
Lx	0,87	23,43	10	0,50	7,25	0,15	0,02	0,23
Ly	0,64	20,97	10	0,50	6,75	0,12	0,02	0,18
10=27	Bidirecional							
Lx	1,97	22,69	10	0,80	7,10	0,36	0,05	0,65
Ly	2,27	18,75	10	0,80	6,30	0,47	0,07	0,86
11=26	Bidirecional							
Lx	1,55	23,11	10	0,63	7,19	0,28	0,04	0,51
Ly	0,54	20,32	10	0,50	6,62	0,10	0,02	0,16
12=30	Bidirecional							
Lx	0,75	23,43	10	0,50	7,25	0,13	0,02	0,20
Ly	0,52	20,97	10	0,50	6,75	0,10	0,01	0,15
13=29	Bidirecional							
Lx	1,79	23,11	10	0,63	7,19	0,32	0,04	0,49
Ly	0,89	20,32	10	0,50	6,62	0,17	0,03	0,26
14=32	Bidirecional							
Lx	1,26	23,11	10	0,63	7,19	0,22	0,03	0,41
Ly	1,21	20,32	10	0,50	6,62	0,24	0,04	0,36
15=31	Bidirecional							
Lx	2,5	22,69	10	0,8	7,1	0,5	0,1	0,82
Ly	1,0	19,49	10	0,5	6,5	0,2	0,0	0,31
17	Bidirecional							
Lx	1,89	23,11	10	0,63	7,19	0,34	0,05	0,62
Ly	1,27	20,00	10	0,63	6,56	0,25	0,04	0,45
22	Bidirecional							
Lx	1,32	23,43	10	0,50	7,25	0,23	0,03	0,35
Ly	0,61	20,97	10	0,50	6,75	0,12	0,02	0,18

Como demonstrado na tabela o dimensionamento das armaduras pode ser realizado considerando a seção retangular, devido a grande folga entre M_d e $M_{r,m}$. Na tabela 4.3.7 é então definida a armadura efetiva de modo que atenda a armadura mínima e que o número de barras de aço utilizadas na nervura não ultrapasse duas para facilitar o posicionamento das armaduras na nervura.

TABELA 4.3.7 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA POSITIVA EFETIVA

1=19	Bidirecional							
Vão -	As,cal [cm²/n]	As,mín [cm²/n]	As,ado [cm²/n]	Q [ud/n]	As,ef [cm²/n]	s ef [cm]	Q ef [ud/n]	Compr [cm]
Lx	0,32	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	297
Ly	0,35	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	302
2=18	Bidirecional							
Lx	0,48	0,37	0,48	1,54	0,62	3	2	284
Ly	0,23	0,37	0,37	1,87	1,87	3	2	361
3=21	Bidirecional							
Lx	0,20	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	242,5
Ly	0,15	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	302
4=20	Bidirecional							
Lx	0,52	0,37	0,52	1,65	0,62	3	2	261
Ly	0,26	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	361
6=23	Bidirecional							
Lx	0,55	0,37	0,55	1,78	0,62	3	2	415
Ly	0,60	0,37	0,60	1,93	0,62	3	2	466
7	Bidirecional							
Lx	0,35	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	264,5
Ly	0,19	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	397
8=25	Bidirecional							
Lx	0,23	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	233
Ly	0,18	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	266
10=27	Bidirecional							
Lx	0,65	0,37	0,65	1,30	1,00	3	2	466
Ly	0,86	0,37	0,86	1,70	1,00	3	2	487
13=29	Bidirecional							
Lx	0,49	0,37	0,49	1,56	0,62	3	2	261
Ly	0,26	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	361
14=32	Bidirecional							
Lx	0,41	0,37	0,41	1,31	0,62	3	2	297
Ly	0,36	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	302
15=31	Bidirecional							
Lx	0,82	0,37	0,82	1,64	1,00	3	2	312
Ly	0,31	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	361
17	Bidirecional							
Lx	0,48	0,37	0,62	1,97	0,62	3	2	252
Ly	0,23	0,37	0,45	1,45	0,62	3	2	345
22	Bidirecional							
Lx	0,35	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	264,5
Ly	0,18	0,37	0,37	1,87	0,39	3	2	397

4.3.2.3 – Armadura Negativa de Flexão

O cálculo e dimensionamento da armadura negativa segue o mesmo procedimento feito para lajes maciças, só é feito novamente a comparação com o momento resistivo da mesa, que desta vez é utilizado em kNm/m pois a armadura negativa continua sendo distribuída por metro na laje, para poder tratar a seção como retangular no ELU.

TABELA 4.3.8 – CÁLCULO DA ARMADURA NEGATIVA NECESSÁRIA

L1-L2 / L19-L18									
Md- [kNm/m]	MR,m [kNm/m]	h [cm]	ϕ [cm]	d [cm]	x [cm]	x/d -	As,cal [cm ² /m]	As,mín [cm ² /m]	As,ado [cm ² /m]
3,07	43,15	10	0,63	8,19	0,31	0,04	0,88	0,611375	1,56
L1-L3 / L19-L21									
3,25	43,15	10	0,63	8,19	0,33	0,04	0,93	0,611375	1,56
L1-L4 / L19-L20									
3,82	43,15	10	0,63	8,19	0,39	0,05	1,09	0,611375	1,56
L2-L4 / L18-L20									
5,07	43,15	10	0,63	8,19	0,52	0,06	1,46	0,611375	1,56
L3-L4 / L21-L20									
3,03	43,15	10	0,63	8,19	0,31	0,04	0,86	0,611375	1,56
L3-L5 / L21-L24									
2,09	43,15	10	0,63	8,19	0,21	0,03	0,59	0,611375	1,56
L3-L6 / L21-L23									
5,84	43,15	10	0,63	8,19	0,61	0,07	1,69	0,611375	1,69
L3-L6 / L21-L23									
1,62	43,15	10	0,63	8,19	0,16	0,02	0,46	0,611375	1,56
L4-L6 / L20-L23									
6,23	43,15	10	0,63	8,19	0,65	0,08	1,81	0,611375	1,81
L4-L7 / L20-L22									
4,12	43,15	10	0,63	8,19	0,42	0,05	1,18	0,611375	1,56
L6-L7 / L23-L22									
5,24	43,15	10	0,63	8,19	0,54	0,07	1,51	0,611375	1,56
L6-L8 / L23-L25									
4,82	43,15	10	0,63	8,19	0,50	0,06	1,39	0,611375	1,56
L6-L10 / L23-L27									
5,84	43,15	10	0,63	8,19	0,61	0,07	1,69	0,611375	1,69
L7-L8 / L22-L25									
3,28	43,15	10	0,63	8,19	0,34	0,04	0,94	0,611375	1,56
L8-L10 / L25-L27									
6,54	43,15	10	0,63	8,19	0,68	0,08	1,90	0,611375	1,90
L8-L11 / L25-L26									
3,33	43,15	10	0,63	8,19	0,34	0,04	0,95	0,611375	1,56

L8-L17									
3,29	43,15	10	0,63	8,19	0,34	0,04	0,94	0,611375	1,56
L9-L12 / L28-L30									
2,09	43,15	10	0,63	8,19	0,21	0,03	0,59	0,611375	1,56
L10-L11 / L27-L26									
6,60	43,15	10	0,63	8,19	0,69	0,08	1,92	0,611375	1,92
L10-L12 / L27-L30									
2,82	43,15	10	0,63	8,19	0,29	0,04	0,80	0,611375	1,56
L10-L12 / L27-L30									
1,62	43,15	10	0,63	8,19	0,16	0,02	0,46	0,611375	1,56
L10-L13 / L27-L29									
4,12	43,15	10	0,63	8,19	0,42	0,05	1,18	0,611375	1,56
L11-L13 / L26-L29									
4,12	43,15	10	0,63	8,19	0,42	0,05	1,18	0,611375	1,56
L12-L13 / L30-L29									
3,03	43,15	10	0,63	8,19	0,31	0,04	0,86	0,611375	1,56
L12-L14 / L30-L32									
3,23	43,15	10	0,63	8,19	0,33	0,04	0,92	0,611375	1,56
L13-L14 / L29-L32									
3,82	43,15	10	0,63	8,19	0,39	0,05	1,09	0,611375	1,56
L13-L15 / L29-L31									
5,41	43,15	10	0,63	8,19	0,56	0,07	1,56	0,611375	1,56
L14-L15 / L32-L31									
3,07	43,15	10	0,63	8,19	0,31	0,04	0,88	0,611375	1,56
L17-L25									
3,29	43,15	10	0,63	8,19	0,34	0,04	0,94	0,611375	1,56

Como todos os momentos negativos das lajes no pavimento são menores que $M_{r,m}$, o dimensionamento da armadura efetiva segue o mesmo processo que foi realizado para as lajes maciças.

TABELA 4.3.9 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA NEGATIVA EFETIVA

L1-L2 / L19-L18						
As,ado [cm ² /m]	s [cm]	L [cm]	Q [ud]	As,ef [cm ² /m]	Lx' [cm]	Compr,eco [cm]
1,56	20	150	8	2	285	112
L1-L3 / L19-L21						
1,56	20	290	15	1,56	285	112
L1-L4 / L19-L20						
1,56	20	122,5	7	1,56	285	112
L2-L4 / L18-L20						
1,56	20	349	18	1,56	272	107

L3-L4 / L21-L20						
1,56	20	115,5	6	1,56	249	99
L3-L5 / L21-L24						
1,56	20	100	5	1,56	230,5	92
L3-L6 / L21-L23						
1,69	18	179	10	1,73	403	156
L3-L6 / L21-L23						
1,56	20	102,5	6	1,56	403	156
L4-L6 / L20-L23						
1,81	17	264	16	1,83	403	156
L4-L7 / L20-L22						
1,56	20	76	4	1,56	252,5	100
L6-L7 / L23-L22						
1,56	20	285,5	15	1,56	403	156
L6-L8 / L23-L25						
1,56	20	105	6	1,56	403	156
L6-L10 / L23-L27						
1,69	18	454	26	1,73	454	176
L7-L8 / L22-L25						
1,56	20	254	13	1,56	252,5	100
L8-L10 / L25-L27						
1,90	16	105	7	1,95	454	176
L8-L11 / L25-L26						
1,56	20	254	13	1,56	254	101
L8-L17						
1,56	20	221	12	1,56	240	95
L9-L12 / L28-L30						
1,56	20	100	5	1,56	230,5	92
L10-L11 / L27-L26						
1,92	16	358,5	23	1,95	454	176
L10-L13 / L27-L29						
1,56	20	264	14	1,56	454	176
L11-L13 / L26-L29						
1,56	20	264	14	1,56	254	101
L12-L13 / L30-L29						
1,56	20	143,5	8	1,56	249	99
L12-L14 / L30-L32						
1,56	20	290	15	1,56	285	112
L13-L14 / L29-L32						
1,56	20	94,5	5	1,56	285	112
L13-L15 / L29-L31						
1,56	19	349	19	1,64	300	118
L14-L15 / L32-L31						
1,56	20	178	9	1,56	300	118

L17-L25						
1,56	20	221	12	1,56	240	95

4.3.2.4 – Reações dos Apoios

Adotando a mesma teoria e formulas utilizadas nas lajes maciças para as lajes nervuradas bidirecionais, na tabela 4.3.10 segue o cálculo das reações de apoio por metro.

TABELA 4.3.10 – CÁLCULO DAS REAÇÕES DE APOIO

Laje	caso	nx	n'x	ny	n'y	p [kN/m²]	Rx [kN/m]	R'x [kN/m]	Ry [kN/m]	R'y [kN/m]
-	-	-	-	-	-					
1=19	3	2,22	3,25	2,17	3,17	6,37	4,12	6,02	4,02	5,87
2=18	2B	3,08	4,51	1,83	0,00	6,37	5,45	7,98	3,24	0,00
3=21	5B	0,00	3,41	1,71	2,50	6,37	0,00	5,14	2,57	3,76
4=20	5B	0,00	3,58	1,71	2,50	10,21	0,00	9,32	4,45	6,51
6=23	5B	0,00	3,24	1,71	2,50	6,37	0,00	8,45	4,46	6,52
7	3	2,90	4,25	2,17	3,17	6,37	4,77	7,00	3,57	5,22
8=25	6	0,00	2,81	0,00	2,50	9,96	0,00	6,35	0,00	5,65
10=27	5A	1,78	2,61	0,00	3,08	6,38	5,23	7,67	0,00	9,03
11=26	3	3,19	4,66	2,17	3,17	6,37	5,28	7,72	3,59	5,25
12=30	5B	0,00	3,41	1,71	2,50	6,37	0,00	5,14	2,57	3,76
13=29	5B	0,00	3,58	1,71	2,50	10,21	0,00	9,32	4,45	6,51
14=32	3	2,22	3,25	2,17	3,17	6,37	4,12	6,02	4,02	5,87
15=31	2B	2,96	4,33	1,83	0,00	6,37	5,76	8,43	3,57	0,00
17	4A	1,99	0,00	0,00	4,14	6,37	3,11	0,00	0,00	6,48
22	3	2,90	4,25	2,17	3,17	6,37	4,77	7,00	3,57	5,22

4.3.2.5 – Cisalhamento

A verificação do cisalhamento também segue o mesmo procedimento teórico usados nas lajes maciças para dispensar o uso de armadura de cisalhamento. A armadura novamente é considerada de ponta a ponta (100% chegando nos apoios). Novamente os seguintes valores utilizados na verificação foram omitidos tabela por serem características de todas as lajes

- $\tau_{rd} = 0,25 * f_{ctd}, \inf = 0,32062 \text{ Mpa}$
- $b(w) = 0,65 \text{ m}$
- $N(sd) = 0$
- $A(c) = 0$
- $\sigma(cp) = 0$
- $f_{ck} = 25 \text{ Mpa}$

- $\alpha(v1) = 0,5$

TABELA 4.3.11 – VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CISALHAMENTO

L1 = L19	d	k	A(S1)	p(1)	V(Rd1)	V(Rd2)	V(sd)	Dentro dos limites?
Reação	[m]	-	[m²/n]	-	[kN/n]	[kN/n]	[kN/n]	
Rx	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	2,68	Sim
Rx'	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	3,91	Sim
Ry	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	2,61	Sim
Ry'	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	3,82	Sim
L2 = L18								
Rx	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	3,54	Sim
Rx'	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	5,19	Sim
Ry	0,0662	1,534	1,87E-04	2,82E-03	27,78	172,89	2,11	Sim
L3 = L21								
Rx'	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	3,34	Sim
Ry	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	1,67	Sim
Ry'	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	2,45	Sim
L4 = L20								
Rx'	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	6,06	Sim
Ry	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	2,89	Sim
Ry'	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	4,23	Sim
L6 = L23								
Rx'	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	5,49	Sim
Ry	0,06555	1,534	6,23E-05	9,51E-04	25,95	171,19	2,90	Sim
Ry'	0,06555	1,534	6,23E-05	9,51E-04	25,95	171,19	4,24	Sim
L7								
Rx	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	3,10	Sim
Rx'	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	4,55	Sim
Ry	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	2,32	Sim
Ry'	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	3,39	Sim
L8 = L25								
Rx	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	0,00	Sim
Rx'	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	4,13	Sim
Ry'	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	3,67	Sim
L10 = L27								
Rx	0,071	1,529	1,00E-04	1,42E-03	28,43	185,42	3,40	Sim
Rx'	0,071	1,529	1,00E-04	1,42E-03	28,43	185,42	4,99	Sim
Ry'	0,063	1,537	1,00E-04	1,59E-03	25,50	164,53	5,87	Sim

L11 = L26								
R _x	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	3,43	Sim
R _{x'}	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	5,02	Sim
R _y	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	2,34	Sim
R _{y'}	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	3,41	Sim
L12 = L30								
R _{x'}	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	3,34	Sim
R _y	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	1,67	Sim
R _{y'}	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	2,45	Sim
L13 = L29								
R _{x'}	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	6,06	Sim
R _y	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	2,89	Sim
R _{y'}	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	4,23	Sim
L14 = L32								
R _x	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	2,68	Sim
R _{x'}	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	3,91	Sim
R _y	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	2,61	Sim
R _{y'}	0,0662	1,534	3,93E-05	5,93E-04	25,89	172,89	3,82	Sim
L15 = L31								
R _x	0,071	1,529	1,00E-04	1,42E-03	28,43	185,42	3,75	Sim
R _{x'}	0,071	1,529	1,00E-04	1,42E-03	28,43	185,42	5,48	Sim
R _y	0,0645	1,536	3,93E-05	6,09E-04	25,27	168,45	2,32	Sim
L17								
R _x	0,07185	1,528	6,23E-05	8,67E-04	28,25	187,64	2,02	Sim
R _{y'}	0,06555	1,534	6,23E-05	9,51E-04	25,95	171,19	4,21	Sim
L22								
R _x	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	3,10	Sim
R _{x'}	0,0725	1,528	3,93E-05	5,41E-04	28,20	189,34	4,55	Sim
R _y	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	2,32	Sim
R _{y'}	0,0675	1,533	3,93E-05	5,81E-04	26,37	176,28	3,39	Sim

Como o esforço de cisalhamento se encontra dentro do limite, é dispensado o uso de armadura de cisalhamento nas lajes nervuradas bidirecionais.

4.3.3 – Estado Limite de Serviço

4.3.3.1 – Verificação de Fissuração

Adotando o mesmo processo utilizado para as lajes maciças, será calculado o momento de fissuração para a seção T da nervura, assim diferente da laje maciça que utilizava $\alpha = 1,5$, aqui será utilizado $\alpha = 1,2$ devido a seção ser T e não retangular

TABELA 4.3.12 – CÁLCULO DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO

Laje Nervurada	α	I(c,I) [m ⁴]	f(ck,m) [kPa]	h(laje) [m]	y(t) [m]	Mr,m / nerv [kN*m]
Seção 1	1,2	1,65E-05	2565	0,1	0,0695	0,73

A seguir será feito a comparação do momento de fissuração com os momentos resultantes da combinação frequente de serviço, caso o momento frequente seja maior que o momento de fissuração deverá ser calculada a abertura das fissuras das lajes.

TABELA 4.3.13 – VERIFICAÇÃO DA FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO FREQUENTE

Laje	p (freq) [kN/m ²]	Mr [kNm/n]	Mx' [kNm/n]	Xx1' [kNm/n]	Xx2' [kNm/n]	My' [kNm/n]	Xy1' [kNm/n]	Xy2' [kNm/n]	Fissura?
1=19	2,18	0,73	0,62	1,11	0,00	0,62	0,00	1,11	Sim
2=18	2,18	0,73	0,78	1,85	0,00	0,41	1,05	0,00	Sim
3=21	2,18	0,73	0,40	2,00	1,11	0,20	0,00	1,18	Sim
4=20	3,96	0,73	0,92	2,25	1,85	0,42	1,39	0,00	Sim
6=23	2,18	0,73	1,45	2,00	2,25	0,81	0,00	1,79	Sim
7,00	2,18	0,73	0,69	1,79	0,00	0,32	1,19	1,60	Sim
8=25	3,85	0,73	0,52	1,21	1,19	0,38	1,65	1,19	Sim
10=27	2,18	0,73	1,59	2,24	2,26	1,20	1,60	2,00	Sim
11=26	2,18	0,73	0,82	2,26	0,00	0,25	1,60	1,21	Sim
12=30	2,18	0,73	0,40	1,10	0,89	0,20	0,00	1,18	Sim
13=29	3,96	0,73	1,13	1,97	1,60	0,42	1,39	0,00	Sim
14=32	2,18	0,73	0,62	0,00	1,10	0,51	0,00	1,39	Sim
15=31	2,18	0,73	0,86	0,00	1,97	0,54	1,05	0,00	Sim
17	2,18	0,73	0,99	0,00	0,00	0,61	1,19	1,19	Sim
22	2,18	0,73	0,69	0,00	1,79	0,32	1,19	1,60	Sim

Como foi apresentado na tabela anterior, ocorre fissuração em todas as lajes, portanto será realizado o cálculo da abertura de fissuração para todas as lajes.

Agora na tabela 4.3.14 será feita a verificação se ocorre fissuração ou não na combinação quase permanente de serviço para avaliação da flecha.

TABELA 4.3.14 – VERIFICAÇÃO DA FISSURAÇÃO NA COMBINAÇÃO QUASE PERMANENTE

Laje	p (freq) [kN/m ²]	Mr [kNm/n]	Mx' [kNm/n]	Xx1' [kNm/n]	Xx2' [kNm/n]	My' [kNm/n]	Xy1' [kNm/n]	Xy2' [kNm/n]	Fissura?
1=19	2,05	0,73	0,59	1,04	0,00	0,58	0,00	1,04	Sim
2=18	2,05	0,73	0,73	1,77	0,00	0,39	0,99	0,00	Sim
3=21	2,05	0,73	0,37	1,88	1,04	0,19	0,00	1,14	Sim
4=20	3,83	0,73	0,89	2,14	1,77	0,42	1,33	0,00	Sim
6=23	2,05	0,73	1,48	1,88	1,88	0,64	0,52	1,68	Sim
7,00	2,05	0,73	0,65	1,68	0,00	0,30	1,13	1,55	Sim
8=25	3,72	0,73	0,52	1,15	1,13	0,37	1,55	1,13	Sim
10=27	2,05	0,73	1,49	2,10	2,12	1,13	1,55	1,88	Sim
11=26	2,05	0,73	0,77	2,12	0,00	0,23	1,55	1,15	Sim
12=30	2,05	0,73	0,37	1,04	0,84	0,19	0,00	1,14	Sim
13=29	3,83	0,73	1,11	1,88	1,55	0,42	1,33	0,00	Sim
14=32	2,05	0,73	0,58	0,00	1,04	0,48	0,00	1,33	Sim
15=31	2,05	0,73	0,81	0,00	1,88	0,51	0,99	0,00	Sim
17	2,05	0,73	0,93	0,00	0,00	0,56	1,13	1,13	Sim
22	2,05	0,73	0,65	0,00	1,68	0,30	1,13	1,55	Sim

Na combinação quase permanente também foi verificado que ocorre fissuração em todas as lajes, portanto o calculo de flecha deverá levar em conta a fissuração.

4.3.3.2 – Fissuração

O calculo da fissuração para laje nervurada bidirecional segue os mesmos procedimentos da laje maciça, assim as explicações teóricas do processo utilizado serão resumidas. Primeiramente será calculado a posição da linha neutra no estágio II para todas as lajes no vão e nos apoios sobre atuação de momento, a mesma seção é utilizada para todas as lajes então as dimensões a seguir serão as utilizadas no calculo de x_{II} :

- $b_w = 0,08$ m
- $h_f = 0,05$ m
- $b_f = 0,65$ m

Os valores de E_s e E_{cs} também são os mesmos, assim o seguinte α_e será usado para todas as lajes

- $\alpha_e = 210000 \text{ Mpa} / 23800 \text{ Mpa} = 8,8235$

Novamente, $A's$ e d' são desprezados por não haver armadura de compressão ($A's = d' = 0$), e assim na tabela 4.2.12 resume o processo já exibindo o $X(II)$ adotado e já realizando o cálculo do momento de inércia no estágio dois puro.

TABELA 4.3.15 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA DO ESTÁDIO DOIS PURO

L1	a1	As	a2	d	a3	X(II) ado	I(c,II)
Reação	[m]	[m²]	[m²]	[m]	[m³]	[m]	[m⁴]
Vão x	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0725	-7,38E-04	2,47E-02	1,18E-05
Apoio x1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0675	-7,36E-04	2,47E-02	1,21E-05
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L2							
Vão x	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0719	-7,52E-04	2,50E-02	1,13E-05
Apoio x1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	1,9E-04	3,01E-02	0,0662	-8,22E-04	2,63E-02	1,06E-05
Apoio y1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L3							
Vão x	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0725	-7,38E-04	2,47E-02	1,18E-05
Apoio x1	0,04	1,1E-04	2,95E-02	0,0819	-7,94E-04	2,60E-02	8,56E-06
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0675	-7,36E-04	2,47E-02	1,21E-05
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L4							
Vão x	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0719	-7,52E-04	2,50E-02	1,13E-05
Apoio x1	0,04	6,2E-04	3,40E-02	0,0819	-1,16E-03	3,29E-02	9,55E-07
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0662	-7,35E-04	2,47E-02	1,23E-05
Apoio y1	0,04	1,6E-04	2,99E-02	0,0819	-8,25E-04	2,67E-02	7,32E-06
L6							
Vão x	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0719	-7,52E-04	2,50E-02	1,13E-05
Apoio x1	0,04	1,1E-04	2,95E-02	0,0819	-7,94E-04	2,60E-02	8,56E-06
Apoio x2	0,04	1,2E-04	2,96E-02	0,0819	-7,99E-04	2,61E-02	8,36E-06
Vão y	0,04	1,9E-04	3,02E-02	0,0656	-8,24E-04	2,64E-02	1,08E-05
Apoio y1	0,04	1,56E-04	2,99E-02	0,0819	-8,25E-04	2,67E-02	7,32E-06
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L7							
Vão x	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0725	-7,38E-04	2,47E-02	1,18E-05
Apoio x1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0675	-7,36E-04	2,47E-02	1,21E-05

Apoio y1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L8							
Vão x	0,04	1,9E-04	3,01E-02	0,0725	-8,32E-04	2,67E-02	8,84E-06
Apoio x1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0675	-7,36E-04	2,47E-02	1,21E-05
Apoio y1	0,04	1,3E-04	2,96E-02	0,0819	-8,04E-04	2,62E-02	8,14E-06
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L10							
Vão x	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0710	-7,75E-04	2,55E-02	1,07E-05
Apoio x1	0,04	0,0E+00	2,85E-02	0,0819	-7,13E-04	2,42E-02	1,26E-05
Apoio x2	0,04	1,3E-04	2,96E-02	0,0819	-8,04E-04	2,62E-02	8,14E-06
Vão y	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0630	-7,68E-04	2,53E-02	1,20E-05
Apoio y1	0,04	1,6E-04	2,99E-02	0,0819	-8,25E-04	2,67E-02	7,32E-06
Apoio y2	0,04	1,1E-04	2,95E-02	0,0819	-7,94E-04	2,60E-02	8,56E-06
L11							
Vão x	0,04	1,6E-04	2,99E-02	0,0719	-8,15E-04	2,63E-02	9,41E-06
Apoio x1	0,04	1,3E-04	2,96E-02	0,0819	-8,04E-04	2,62E-02	8,14E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0662	-7,35E-04	2,47E-02	1,23E-05
Apoio y1	0,04	0,0E+00	2,85E-02	0,0819	-7,13E-04	2,42E-02	1,26E-05
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L12							
Vão x	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0725	-7,38E-04	2,47E-02	1,18E-05
Apoio x1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0675	-7,36E-04	2,47E-02	1,21E-05
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L13							
Vão x	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0719	-7,52E-04	2,50E-02	1,13E-05
Apoio x1	0,04	1,1E-04	2,94E-02	0,0819	-7,90E-04	2,59E-02	8,75E-06
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0662	-7,35E-04	2,47E-02	1,23E-05
Apoio y1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L14							
Vão x	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0719	-7,52E-04	2,50E-02	1,13E-05
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0662	-7,35E-04	2,47E-02	1,23E-05
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06

L15							
Vão x	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0710	-7,75E-04	2,55E-02	1,07E-05
Apoio x2	0,04	1,1E-04	2,94E-02	0,0819	-7,90E-04	2,59E-02	8,75E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0645	-7,35E-04	2,46E-02	1,24E-05
Apoio y1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L17							
Vão x	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0719	-7,52E-04	2,50E-02	1,13E-05
Vão y	0,04	6,2E-05	2,90E-02	0,0656	-7,49E-04	2,49E-02	1,20E-05
Apoio y1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
L22							
Vão x	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0725	-7,38E-04	2,47E-02	1,18E-05
Apoio x2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Vão y	0,04	3,9E-05	2,88E-02	0,0675	-7,36E-04	2,47E-02	1,21E-05
Apoio y1	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06
Apoio y2	0,04	1,0E-04	2,94E-02	0,0819	-7,86E-04	2,58E-02	8,91E-06

Para o cálculo da abertura de fissuras será considerada uma A_{cr} diferente da utilizada para laje maciça, já que a barra de aço se encontra em uma nervura agora, o perímetro agora área retangular será composto por D_x , D_{y1} e D_{y2} , o valor de D_x considerado será a metade da espessura da nervura (bw), enquanto D_{y1} e D_{y2} continuam com as mesmas exigências de q suas dimensões devem ser menor ou iguais a $7,5 * \Phi_i$, $D_{y1} \leq y_{si}$ e $D_{y2} \leq d''$. Assim $A_{cr} = D_x * (D_{y1} + D_{y2})$. Os valores de bw , η_i , E_{si} e $f_{ctk,m}$ se repetem novamente como iguais todas as lajes:

- $bw = 0,08 \text{ m}$
- $\eta_i = 2,25$ (barra nervurada)
- $E_{si} = 210000000 \text{ kPa}$
- $f_{ctk,m} = 2565 \text{ kPa}$

Na tabela 4.2.15 segue os dados específicos de todas as lajes que serão utilizados no cálculo da abertura de fissuração

TABELA 4.3.16 – DADOS INICIAIS PARA CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAS

	M(d,freq)	I(c,II)	d	d''	x(II)	y(si)	$\sigma(si)$	Φ_i
L1	[kN*m/n]	[m^4]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kPa]	[m]
Vão x	0,62	4,06E-06	0,0725	0,0275	0,0247	0,0478	6,46E+04	0,0050
Apoio x1	1,11	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,39E+04	0,0063
Vão y	0,62	3,89E-06	0,0675	0,0325	0,0247	0,0428	5,98E+04	0,0050
Apoio y2	1,11	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,39E+04	0,0063

L2								
Vão x	0,78	4,60E-06	0,0719	0,02815	0,0250	0,0468	6,98E+04	0,0063
Apoio x1	1,85	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,40E+05	0,0063
Vão y	0,41	6,58E-06	0,0662	0,0338	0,0263	0,0399	2,21E+04	0,0050
Apoio y1	1,05	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	7,95E+04	0,0063
L3								
Vão x	0,40	4,06E-06	0,0725	0,0275	0,0247	0,0478	4,12E+04	0,0050
Apoio x1	2,00	6,91E-06	0,0819	0,01815	0,0260	0,0559	1,43E+05	0,0063
Apoio x2	1,11	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,39E+04	0,0063
Vão y	0,20	3,89E-06	0,0675	0,0325	0,0247	0,0428	1,98E+04	0,0050
Apoio y2	1,18	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,89E+04	0,0063
L4								
Vão x	0,92	4,60E-06	0,0719	0,02815	0,0250	0,0468	8,23E+04	0,0063
Apoio x1	2,25	2,09E-05	0,0819	0,01815	0,0329	0,0489	4,65E+04	0,0063
Apoio x2	1,85	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,40E+05	0,0063
Vão y	0,42	3,84E-06	0,0662	0,0338	0,0247	0,0415	4,03E+04	0,0050
Apoio y1	1,39	8,30E-06	0,0819	0,01815	0,0267	0,0552	8,17E+04	0,0063
L6								
Vão x	1,45	4,60E-06	0,0719	0,02815	0,0250	0,0468	1,30E+05	0,0063
Apoio x1	2,00	6,91E-06	0,0819	0,01815	0,0260	0,0559	1,43E+05	0,0063
Apoio x2	2,00	7,12E-06	0,0819	0,01815	0,0261	0,0557	1,38E+05	0,0063
Vão y	0,81	6,59E-06	0,0656	0,03445	0,0264	0,0392	4,26E+04	0,0063
Apoio y1	0,55	8,30E-06	0,0819	0,01815	0,0267	0,0552	3,25E+04	0,0063
Apoio y2	0,00	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	0,00E+00	0,0063
L7								
Vão x	0,69	4,06E-06	0,0725	0,0275	0,0247	0,0478	7,18E+04	0,0050
Apoio x1	1,79	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,35E+05	0,0063
Vão y	0,32	3,89E-06	0,0675	0,0325	0,0247	0,0428	3,14E+04	0,0050
Apoio y1	1,19	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	9,00E+04	0,0063
Apoio y2	1,60	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,21E+05	0,0063
L8								
Vão x	0,52	7,57E-06	0,0725	0,0275	0,0267	0,0458	2,79E+04	0,0050
Apoio x1	1,21	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	9,12E+04	0,0063
Apoio x2	1,19	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	9,00E+04	0,0063
Vão y	0,38	3,89E-06	0,0675	0,0325	0,0247	0,0428	3,69E+04	0,0050
Apoio y1	1,65	7,36E-06	0,0819	0,01815	0,0262	0,0556	1,10E+05	0,0063
Apoio y2	1,19	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,98E+04	0,0063
L10								
Vão x	1,59	5,43E-06	0,0710	0,029	0,0255	0,0455	1,17E+05	0,0080
Apoio x1	2,24	3,06E-06	0,0819	0,01815	0,0242	0,0577	3,72E+05	0,0063

Apoio x2	2,26	7,36E-06	0,0819	0,01815	0,0262	0,0556	1,50E+05	0,0063
Vão y	1,20	4,76E-06	0,0630	0,037	0,0253	0,0377	8,37E+04	0,0080
Apoio y1	1,60	8,30E-06	0,0819	0,01815	0,0267	0,0552	9,38E+04	0,0063
Apoio y2	2,00	6,91E-06	0,0819	0,01815	0,0260	0,0559	1,43E+05	0,0063
L11								
Vão x	0,82	6,91E-06	0,0719	0,02815	0,0263	0,0455	4,75E+04	0,0063
Apoio x1	2,26	7,36E-06	0,0819	0,01815	0,0262	0,0556	1,50E+05	0,0063
Vão y	0,25	3,84E-06	0,0662	0,0338	0,0247	0,0415	2,37E+04	0,0050
Apoio y1	1,60	3,06E-06	0,0819	0,01815	0,0242	0,0577	2,66E+05	0,0063
Apoio y2	1,21	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	9,12E+04	0,0063
L12								
Vão x	0,40	4,06E-06	0,0725	0,0275	0,0247	0,0478	4,12E+04	0,0050
Apoio x1	1,10	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,34E+04	0,0063
Apoio x2	0,89	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	6,75E+04	0,0063
Vão y	0,20	3,89E-06	0,0675	0,0325	0,0247	0,0428	1,98E+04	0,0050
Apoio y2	1,18	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,89E+04	0,0063
L13								
Vão x	1,13	4,60E-06	0,0719	0,02815	0,0250	0,0468	1,02E+05	0,0063
Apoio x1	1,97	6,71E-06	0,0819	0,01815	0,0259	0,0559	1,45E+05	0,0063
Apoio x2	1,60	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,21E+05	0,0063
Vão y	0,42	3,84E-06	0,0662	0,0338	0,0247	0,0415	4,03E+04	0,0050
Apoio y1	1,39	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,05E+05	0,0063
L14								
Vão x	0,62	4,60E-06	0,0719	0,02815	0,0250	0,0468	5,57E+04	0,0063
Apoio x2	1,10	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,34E+04	0,0063
Vão y	0,51	3,84E-06	0,0662	0,0338	0,0247	0,0415	4,83E+04	0,0050
Apoio y2	1,39	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,05E+05	0,0063
L15								
Vão x	0,86	5,43E-06	0,0710	0,029	0,0255	0,0455	6,35E+04	0,0080
Apoio x2	1,97	6,71E-06	0,0819	0,01815	0,0259	0,0559	1,45E+05	0,0063
Vão y	1,05	3,79E-06	0,0645	0,0355	0,0246	0,0399	9,75E+04	0,0050
Apoio y1	1,05	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	7,95E+04	0,0063
L17								
Vão x	0,99	4,60E-06	0,0719	0,02815	0,0250	0,0468	8,91E+04	0,0063
Vão y	0,61	4,26E-06	0,0656	0,03445	0,0249	0,0406	5,10E+04	0,0063
Apoio y1	1,19	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,98E+04	0,0063
Apoio y2	1,19	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	8,98E+04	0,0063
L22								
Vão x	0,69	4,06E-06	0,0725	0,0275	0,0247	0,0478	7,18E+04	0,0050

Apoio x2	1,79	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,35E+05	0,0063
Vão y	0,32	3,89E-06	0,0675	0,0325	0,0247	0,0428	3,14E+04	0,0050
Apoio y1	1,19	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	9,00E+04	0,0063
Apoio y2	1,60	6,54E-06	0,0819	0,01815	0,0258	0,0560	1,21E+05	0,0063

Com estes dados é então definida a área de concreto protegida pela barra de aço e a taxa de armadura da região.

TABELA 4.3.17 – AREA DE CONCRETO E TAXA DE ARMADURA DA REGIÃO ENVOLVIDA

	D(x)	D(y1)	D(y2)	As(un)	A(cr)	p(ri)
L1	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	-
Vão x	0,04	0,0375	0,0275	1,96E-05	2,60E-03	0,008
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0325	1,96E-05	2,80E-03	0,007
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L2						
Vão x	0,04	0,0468	0,0282	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0338	1,96E-05	2,85E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L3						
Vão x	0,04	0,0375	0,0275	1,96E-05	2,60E-03	0,008
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0325	1,96E-05	2,80E-03	0,007
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L4						
Vão x	0,04	0,0468	0,0282	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0338	1,96E-05	2,85E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L6						
Vão x	0,04	0,0468	0,0282	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0392	0,0345	3,12E-05	2,95E-03	0,011
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012

Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L7						
Vão x	0,04	0,0375	0,0275	1,96E-05	2,60E-03	0,008
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0325	1,96E-05	2,80E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L8						
Vão x	0,04	0,0375	0,0275	1,96E-05	2,60E-03	0,008
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0325	1,96E-05	2,80E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L10						
Vão x	0,04	0,0455	0,0290	5,02E-05	2,98E-03	0,017
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0377	0,0370	5,02E-05	2,99E-03	0,017
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L11						
Vão x	0,04	0,0455	0,0282	3,12E-05	2,95E-03	0,011
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0338	1,96E-05	2,85E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L12						
Vão x	0,04	0,0375	0,0275	1,96E-05	2,60E-03	0,008
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0325	1,96E-05	2,80E-03	0,007
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L13						
Vão x	0,04	0,0468	0,0282	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Apoio x1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0338	1,96E-05	2,85E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012

L14						
Vão x	0,04	0,0468	0,0282	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0338	1,96E-05	2,85E-03	0,007
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L15						
Vão x	0,04	0,0455	0,0290	5,02E-05	2,98E-03	0,017
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0355	1,96E-05	2,92E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L17						
Vão x	0,04	0,0468	0,0282	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Vão y	0,04	0,0406	0,0345	3,12E-05	3,00E-03	0,010
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
L22						
Vão x	0,04	0,0375	0,0275	1,96E-05	2,60E-03	0,008
Apoio x2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Vão y	0,04	0,0375	0,0325	1,96E-05	2,80E-03	0,007
Apoio y1	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012
Apoio y2	0,04	0,0473	0,0182	3,12E-05	2,62E-03	0,012

Por fim, pode-se calcular os valores de w_1 e w_2 e adotar o menor valor entre eles para verificar se ele ultrapassa o valor absoluto aceitável de abertura de fissuras.

TABELA 4.3.18 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DAS LAJES

	w(1)	w(2)	w	w(limite)	Dentro
L1	[m]	[m]	[mm]	[mm]	do limite?
Vão x	4,14E-06	3,15E-05	0,004	0,3	Sim
Apoio x1	8,79E-06	3,41E-05	0,009	0,3	Sim
Vão y	3,54E-06	3,12E-05	0,004	0,3	Sim
Apoio y2	8,79E-06	3,41E-05	0,009	0,3	Sim
L2					
Vão x	6,08E-06	3,20E-05	0,006	0,3	Sim
Apoio x1	2,45E-05	5,69E-05	0,024	0,3	Sim
Vão y	4,82E-07	1,17E-05	0,000	0,3	Sim
Apoio y1	7,88E-06	3,23E-05	0,008	0,3	Sim

L3					
Vão x	1,68E-06	2,00E-05	0,002	0,3	Sim
Apoio x1	2,54E-05	5,79E-05	0,025	0,3	Sim
Apoio x2	8,79E-06	3,41E-05	0,009	0,3	Sim
Vão y	3,90E-07	1,03E-05	0,000	0,3	Sim
Apoio y2	9,86E-06	3,61E-05	0,010	0,3	Sim
L4					
Vão x	8,45E-06	3,78E-05	0,008	0,3	Sim
Apoio x1	2,69E-06	1,89E-05	0,003	0,3	Sim
Apoio x2	2,45E-05	5,69E-05	0,024	0,3	Sim
Vão y	1,60E-06	2,13E-05	0,002	0,3	Sim
Apoio y1	8,32E-06	3,32E-05	0,008	0,3	Sim
L6					
Vão x	2,10E-05	5,95E-05	0,021	0,3	Sim
Apoio x1	2,54E-05	5,79E-05	0,025	0,3	Sim
Apoio x2	2,38E-05	5,61E-05	0,024	0,3	Sim
Vão y	2,27E-06	1,92E-05	0,002	0,3	Sim
Apoio y1	1,32E-06	1,32E-05	0,001	0,3	Sim
Apoio y2	0,00E+00	0,00E+00	0,000	0,3	Sim
L7					
Vão x	5,10E-06	3,49E-05	0,005	0,3	Sim
Apoio x1	2,29E-05	5,50E-05	0,023	0,3	Sim
Vão y	9,73E-07	1,63E-05	0,001	0,3	Sim
Apoio y1	1,01E-05	3,66E-05	0,010	0,3	Sim
Apoio y2	1,82E-05	4,91E-05	0,018	0,3	Sim
L8					
Vão x	7,73E-07	1,36E-05	0,001	0,3	Sim
Apoio x1	1,04E-05	3,71E-05	0,010	0,3	Sim
Apoio x2	1,01E-05	3,66E-05	0,010	0,3	Sim
Vão y	1,35E-06	1,93E-05	0,001	0,3	Sim
Apoio y1	1,50E-05	4,46E-05	0,015	0,3	Sim
Apoio y2	1,01E-05	3,65E-05	0,010	0,3	Sim
L10					
Vão x	2,18E-05	4,49E-05	0,022	0,3	Sim
Apoio x1	1,72E-04	1,51E-04	0,151	0,3	Sim
Apoio x2	2,82E-05	6,11E-05	0,028	0,3	Sim
Vão y	1,11E-05	3,21E-05	0,011	0,3	Sim
Apoio y1	1,10E-05	3,81E-05	0,011	0,3	Sim
Apoio y2	2,54E-05	5,79E-05	0,025	0,3	Sim

L11					
Vão x	2,81E-06	2,15E-05	0,003	0,3	Sim
Apoio x1	2,82E-05	6,11E-05	0,028	0,3	Sim
Vão y	5,58E-07	1,26E-05	0,001	0,3	Sim
Apoio y1	8,80E-05	1,08E-04	0,088	0,3	Sim
Apoio y2	1,04E-05	3,71E-05	0,010	0,3	Sim
L12					
Vão x	1,68E-06	2,00E-05	0,002	0,3	Sim
Apoio x1	8,67E-06	3,39E-05	0,009	0,3	Sim
Apoio x2	5,68E-06	2,74E-05	0,006	0,3	Sim
Vão y	3,90E-07	1,03E-05	0,000	0,3	Sim
Apoio y2	9,86E-06	3,61E-05	0,010	0,3	Sim
L13					
Vão x	1,29E-05	4,66E-05	0,013	0,3	Sim
Apoio x1	2,61E-05	5,88E-05	0,026	0,3	Sim
Apoio x2	1,82E-05	4,91E-05	0,018	0,3	Sim
Vão y	1,60E-06	2,13E-05	0,002	0,3	Sim
Apoio y1	1,38E-05	4,27E-05	0,014	0,3	Sim
L14					
Vão x	3,86E-06	2,55E-05	0,004	0,3	Sim
Apoio x2	8,67E-06	3,39E-05	0,009	0,3	Sim
Vão y	2,31E-06	2,56E-05	0,002	0,3	Sim
Apoio y2	1,38E-05	4,27E-05	0,014	0,3	Sim
L15					
Vão x	6,40E-06	2,43E-05	0,006	0,3	Sim
Apoio x2	2,61E-05	5,88E-05	0,026	0,3	Sim
Vão y	9,42E-06	5,29E-05	0,009	0,3	Sim
Apoio y1	7,88E-06	3,23E-05	0,008	0,3	Sim
L17					
Vão x	9,90E-06	4,09E-05	0,010	0,3	Sim
Vão y	3,24E-06	2,34E-05	0,003	0,3	Sim
Apoio y1	1,01E-05	3,65E-05	0,010	0,3	Sim
Apoio y2	1,01E-05	3,65E-05	0,010	0,3	Sim
L22					
Vão x	5,10E-06	3,49E-05	0,005	0,3	Sim
Apoio x2	2,29E-05	5,50E-05	0,023	0,3	Sim
Vão y	9,73E-07	1,63E-05	0,001	0,3	Sim
Apoio y1	1,01E-05	3,66E-05	0,010	0,3	Sim
Apoio y2	1,82E-05	4,91E-05	0,018	0,3	Sim

4.3.3.3 – Flecha

Como foi verificado anteriormente, ocorre fissuração em todas as lajes do pavimento e isto significa que deverá ser contabilizado a contribuição da fissuração na flecha. Esta contribuição é considerada através da utilização do momento fletor equivalente (I_{ceq}) que expressa a transição do momento fletor entre o estágio I não fissurado e o estágio II puro totalmente fissurado, sendo que ele deve ficar dentro do intervalo de $I_{c,I} \leq I_{ceq} \leq I_{c,II}$. Este momento fletor equivalente é calculado pela seguinte formula:

$$I_{ceq} = (M_{r,m} / M_a)^3 * I_{c,I} + [1 - (M_{r,m} / M_a)^3] * I_{c,II}$$

A partir do momento de inércia equivalente é extraído uma altura de uma seção retangular equivalente (h_{eq}) que substituirá a altura da laje (h_t) na formula da flecha

$$F_{elástica+fissuração} = p * L_x^4 * \alpha / (E_{cs} * h_{eq}^3 * 100)$$

A tabela 4.3.19 apresenta o cálculo de I_{ceq} respeitando a condição que $I_{c,I} \leq I_{ceq} \leq I_{c,II}$, o momento de inércia equivalente será calculado somente para o vão L_x que é o considerado na formula da flecha.

TABELA 4.3.19 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA EQUIVALENTE

L1	Mr,m / nerv	Ma / nerv	Mr,m/Ma	I(c,I)	I(c,II)	I(c,eq)
Direção	[kN*m]	[kN*m]	-	[m^4]	[m^4]	[m^4]
Vão x	0,73	0,59	1,25	1,65E-05	4,06E-06	1,65E-05
Apoio x1	0,73	1,04	0,70	1,65E-05	6,54E-06	9,96E-06
L2						
Vão x	0,73	0,73	1,00	1,65E-05	4,60E-06	1,65E-05
Apoio x1	0,73	1,77	0,41	1,65E-05	6,54E-06	7,24E-06
L3						
Vão x	0,73	0,37	1,96	1,65E-05	4,06E-06	1,65E-05
Apoio x1	0,73	1,88	0,39	1,65E-05	6,91E-06	7,47E-06
Apoio x2	0,73	1,04	0,70	1,65E-05	6,54E-06	9,96E-06
L4						
Vão x	0,73	0,89	0,82	1,65E-05	4,60E-06	1,13E-05
Apoio x1	0,73	2,14	0,34	1,65E-05	2,09E-05	2,07E-05
Apoio x2	0,73	1,77	0,41	1,65E-05	6,54E-06	7,24E-06
L6						
Vão x	0,73	1,48	0,50	1,65E-05	4,60E-06	6,05E-06
Apoio x1	0,73	1,88	0,39	1,65E-05	6,91E-06	7,47E-06
Apoio x2	0,73	1,88	0,39	1,65E-05	7,12E-06	7,67E-06

L7						
Vão x	0,73	0,65	1,12	1,65E-05	4,06E-06	1,65E-05
Apoio x1	0,73	1,68	0,43	1,65E-05	6,54E-06	7,35E-06
L8						
Vão x	0,73	0,52	1,40	1,65E-05	7,57E-06	1,65E-05
Apoio x1	0,73	1,15	0,64	1,65E-05	6,54E-06	9,10E-06
Apoio x2	0,73	1,13	0,64	1,65E-05	6,54E-06	9,20E-06
L10						
Vão x	0,73	1,49	0,49	1,65E-05	5,43E-06	6,73E-06
Apoio x1	0,73	2,10	0,35	1,65E-05	3,06E-06	3,63E-06
Apoio x2	0,73	2,12	0,34	1,65E-05	7,36E-06	7,74E-06
L11						
Vão x	0,73	0,77	0,95	1,65E-05	6,91E-06	1,52E-05
Apoio x1	0,73	2,12	0,34	1,65E-05	7,36E-06	7,74E-06
L12						
Vão x	0,73	0,37	1,96	1,65E-05	4,06E-06	1,65E-05
Apoio x1	0,73	1,04	0,71	1,65E-05	6,54E-06	1,00E-05
Apoio x2	0,73	0,84	0,87	1,65E-05	6,54E-06	1,31E-05
L13						
Vão x	0,73	1,11	0,66	1,65E-05	4,60E-06	8,03E-06
Apoio x1	0,73	1,88	0,39	1,65E-05	6,71E-06	7,29E-06
Apoio x2	0,73	1,55	0,47	1,65E-05	6,54E-06	7,59E-06
L14						
Vão x	0,73	0,58	1,25	1,65E-05	4,60E-06	1,65E-05
Apoio x2	0,73	1,04	0,71	1,65E-05	6,54E-06	1,00E-05
L15						
Vão x	0,73	0,81	0,90	1,65E-05	5,43E-06	1,36E-05
Apoio x2	0,73	1,88	0,39	1,65E-05	6,71E-06	7,29E-06
L17						
Vão x	0,73	0,93	0,78	1,65E-05	4,60E-06	1,03E-05
L22						
Vão x	0,73	0,65	1,12	1,65E-05	4,06E-06	1,65E-05
Apoio x2	0,73	1,68	0,43	1,65E-05	6,54E-06	7,35E-06

Percebe-se então que há uma diferença entre os momentos de inércia equivalentes dos vãos e apoios das lajes. Para obter um I_{eq} que represente melhor a laje inteira na direção desejada, é realizada uma média ponderada entre os valores de I_{eq} com uma estimativa do comprimento de atuação do respectivo momento fletor. Abaixo se encontra a ponderação utilizada

- Apoio-engaste: Positivo: $80\% * L$; Negativo: $20\% * L$
- Bi-engastada: Positivo: $70\% * L$; Negativo: 15%

Após a média ponderada é então calculada a altura equivalente de uma seção retangular a ser usada para verificar a flecha da laje

TABELA 4.3.20 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA EQUIVALENTE PARA A LAJE

L1	I(c,eq)	L	Vinculação	L de Inf.	I(c,eq) ef	h,eq
Direção	[m^4]	[m]	[m]	[m]	[m^4]	[m]
Vão x	1,65E-05	2,91	apoio-engaste	2,328	1,52E-05	0,0655
Apoio x1	9,96E-06	2,91		0,582		
L2						
Vão x	1,65E-05	2,78	apoio-engaste	2,224	1,47E-05	0,0647
Apoio x1	7,24E-06	2,78		0,556		
L3						
Vão x	1,65E-05	2,365	engaste-engaste	1,6555	1,42E-05	0,0640
Apoio x1	7,47E-06	2,365		0,35475		
Apoio x2	9,96E-06	2,365		0,35475		
L4						
Vão x	1,13E-05	2,55	engaste-engaste	1,785	1,21E-05	0,0606
Apoio x1	2,07E-05	2,55		0,3825		
Apoio x2	7,24E-06	2,55		0,3825		
L6						
Vão x	6,05E-06	4,09	engaste-engaste	2,045	6,81E-06	0,0501
Apoio x1	7,47E-06	4,09		1,0225		
Apoio x2	7,67E-06	4,09		1,0225		
L7						
Vão x	1,65E-05	2,585	apoio-engaste	1,8095	1,38E-05	0,0633
Apoio x1	7,35E-06	2,585		0,7755		
L8						
Vão x	1,65E-05	2,27	engaste-engaste	1,135	1,28E-05	0,0619
Apoio x1	9,10E-06	2,27		0,5675		
Apoio x2	9,20E-06	2,27		0,5675		
L10						
Vão x	6,73E-06	4,6	engaste-engaste	2,3	6,21E-06	0,0486
Apoio x1	3,63E-06	4,6		1,15		
Apoio x2	7,74E-06	4,6		1,15		

L11						
Vão x	1,52E-05	2,6	apoio-engaste	1,82	1,29E-05	0,0621
Apoio x1	7,74E-06	2,6		0,78		
L12						
Vão x	1,65E-05	2,365	engaste-engaste	1,1825	1,40E-05	0,0638
Apoio x1	1,00E-05	2,365		0,59125		
Apoio x2	1,31E-05	2,365		0,59125		
L13						
Vão x	8,03E-06	2,55	engaste-engaste	1,275	7,73E-06	0,0523
Apoio x1	7,29E-06	2,55		0,6375		
Apoio x2	7,59E-06	2,55		0,6375		
L14						
Vão x	1,65E-05	2,91	apoio-engaste	2,037	1,46E-05	0,0645
Apoio x2	1,00E-05	2,91		0,873		
L15						
Vão x	1,36E-05	3,06	apoio-engaste	2,142	1,17E-05	0,0600
Apoio x2	7,29E-06	3,06		0,918		
L17						
Vão x	1,03E-05	2,46	apoio-apoio	2,46	1,03E-05	0,0576
L22						
Vão x	1,65E-05	2,585	apoio-engaste	1,8095	1,38E-05	0,0633
Apoio x2	7,35E-06	2,585		0,7755		

Agora utilizando a altura equivalente o cálculo da flecha segue os mesmo procedimentos do usado na laje maciça, no entanto desta vez a fissuração está sendo considerada.

TABELA 4.3.21 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A DEFORMAÇÃO ELÁSTICA E A FISSURAÇÃO

Laje	p [kN/m²]	Lx [m]	α -	Ecs [kPa]	h,eq [m]	f(elástica+fissuração) [m]
L1	2,05	2,91	2,47	2,38E+07	0,0655	5,43E-04
L2	2,05	2,78	4,27	2,38E+07	0,0647	8,11E-04
L3	2,05	2,365	2,37	2,38E+07	0,0640	2,44E-04
L4	3,83	2,55	2,54	2,38E+07	0,0606	7,74E-04
L6	2,05	4,09	2,08	2,38E+07	0,0501	4,00E-03
L7	2,05	2,585	4,46	2,38E+07	0,0633	6,75E-04
L8	3,72	2,27	1,90	2,38E+07	0,0619	3,32E-04
L10	2,05	4,6	2,08	2,38E+07	0,0486	7,00E-03

L11	2,05	2,6	5,26	2,38E+07	0,0621	8,65E-04
L12	2,05	2,365	2,37	2,38E+07	0,0638	2,46E-04
L13	3,83	2,55	2,54	2,38E+07	0,0523	1,21E-03
L14	2,05	2,91	2,47	2,38E+07	0,0645	5,66E-04
L15	2,05	3,06	3,89	2,38E+07	0,0600	1,36E-03
L17	2,05	2,46	5,03	2,38E+07	0,0576	8,31E-04
L22	2,05	2,585	4,46	2,38E+07	0,0633	6,75E-04

É utilizado as mesmas considerações da laje maciça quanto ao tempo no o cálculo αf , assim o a tabela 4.3.22 apresenta a verificação final da flecha consideração a deformação por elasticidade, fissuração e fluência.

TABELA 4.3.22 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A FLUÊNCIA

Laje	αf -	f(elást + fiss) [m]	f(fluência) [m]	f(elas+fiss+flu) [m]	f(elas+fiss+flu) [mm]	Limite: L/250 [mm]
L1	1,32	5,43E-04	7,17E-04	1,26E-03	1,26	11,64
L2	1,32	8,11E-04	1,07E-03	1,88E-03	1,88	11,12
L3	1,32	2,44E-04	3,22E-04	5,66E-04	0,57	9,46
L4	1,32	7,74E-04	1,02E-03	1,80E-03	1,80	10,2
L6	1,32	4,00E-03	5,28E-03	9,28E-03	9,28	16,36
L7	1,32	6,75E-04	8,92E-04	1,57E-03	1,57	10,34
L8	1,32	3,32E-04	4,39E-04	7,72E-04	0,77	9,08
L10	1,32	7,00E-03	9,25E-03	1,63E-02	16,26	18,4
L11	1,32	8,65E-04	1,14E-03	2,01E-03	2,01	10,4
L12	1,32	2,46E-04	3,25E-04	5,71E-04	0,57	9,46
L13	1,32	1,21E-03	1,60E-03	2,81E-03	2,81	10,2
L14	1,32	5,66E-04	7,48E-04	1,31E-03	1,31	11,64
L15	1,32	1,36E-03	1,79E-03	3,15E-03	3,15	12,24
L17	1,32	8,31E-04	1,10E-03	1,93E-03	1,93	9,84
L22	1,32	6,75E-04	8,92E-04	1,57E-03	1,57	10,34

Agora pode se apresentar o fator determinante nesse dimensionamento da seção da laje nervurada de armadura bidirecional, que foi a flecha final da laje 10 que chegou a 14,76 mm com uma folga de 3,64 mm da flecha limite.

Enfim, é calculado a flecha devido a carga acidental para a verificação do estado limite de vibração.

TABELA 4.3.23 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À CARGA VERTICAL DE USO

Laje	p [kN/m ²]	Lx [m]	α -	Ecs [kPa]	h,eq [m]	f(vibração) [m]	f(vibração) [mm]	Limite: L/350 [mm]
L1	1,30	2,91	2,47	2,38E+07	0,065	3,48E-04	0,35	8,31
L2	1,30	2,78	4,27	2,38E+07	0,064	5,20E-04	0,52	7,94
L3	1,30	2,37	2,37	2,38E+07	0,064	1,57E-04	0,16	6,76
L4	1,30	2,55	2,54	2,38E+07	0,059	2,83E-04	0,28	7,29
L6	1,30	4,09	2,08	2,38E+07	0,049	2,66E-03	2,66	11,69
L7	1,30	2,59	4,46	2,38E+07	0,063	4,34E-04	0,43	7,39
L8	1,30	2,27	1,90	2,38E+07	0,061	1,20E-04	0,12	6,49
L10	1,30	4,60	2,08	2,38E+07	0,050	4,03E-03	4,03	13,14
L11	1,30	2,60	5,26	2,38E+07	0,062	5,59E-04	0,56	7,43
L12	1,30	2,37	2,37	2,38E+07	0,063	1,59E-04	0,16	6,76
L13	1,30	2,55	2,54	2,38E+07	0,051	4,33E-04	0,43	7,29
L14	1,30	2,91	2,47	2,38E+07	0,064	3,65E-04	0,36	8,31
L15	1,30	3,06	3,89	2,38E+07	0,060	8,78E-04	0,88	8,74
L17	1,30	2,46	5,03	2,38E+07	0,058	5,28E-04	0,53	7,03
L22	1,30	2,59	4,46	2,38E+07	0,063	4,34E-04	0,43	7,39

4.3.4 – Armadura de Distribuição

A armadura distribuição da mesa da laje nervurada bidirecional é facilmente calculada considerando que deve ser maior que 20% da armadura secundária de flexão positiva e deve respeitar o espaçamento máximo de 30 cm. A tabela 4.3.23 apresenta a armadura apresenta este cálculo

TABELA 4.3.24 – ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO DA MESA

Laje -	Φ cm	As/m sec cm ² /m	0,2*As cm ² /m	s cm	As,ef cm ² /m	Qx ud	Qy ud
L1	0,5	0,60	0,12	30	0,65	10	10
L2	0,5	2,87	0,57	30	0,65	12	10
L3	0,5	0,60	0,12	30	0,65	10	8
L4	0,5	0,60	0,12	30	0,65	12	9
L5	0,5	0,60	0,12	30	0,65	10	4
L6	0,5	0,96	0,19	30	0,65	16	14
L7	0,5	0,60	0,12	30	0,65	14	9
L8	0,5	0,60	0,12	30	0,65	9	8
L9	0,5	0,60	0,12	30	0,65	14	4

L10	0,5	1,55	0,31	30	0,65	17	16
L11	0,5	0,60	0,12	30	0,65	17	9
L12	0,5	0,60	0,12	30	0,65	10	8
L13	0,5	0,60	0,12	30	0,65	12	9
L14	0,5	0,60	0,12	30	0,65	10	10
L15	0,5	0,60	0,12	30	0,65	12	11
L16	0,5	0,60	0,12	30	0,65	13	6
L17	0,5	0,96	0,19	30	0,65	12	9
L22	0,5	0,60	0,12	30	0,65	14	9

4.3.5 – Quantitativo e Custos dos Materiais

Assim como foi feito para a laje maciça, será feita uma simples estimativa do custo de concreto e aço que serão consumidos na alternativa de laje nervurada bi-direcional com EPS.

O volume de concreto para as lajes do pavimento considerando as lajes de todo o pavimento o volume é de 19,54 m³. O peso de aço utilizado nas lajes considerando as lajes de todo o pavimento o peso é de 1513,59 kg.

A tabela a seguir apresenta o consumo e custo de cada material contabilizado

TABELA 4.2.25 – CUSTOS DOS MATERIAIS

Produto	Custo unitário	Consumo	Custo (R\$)
Concreto 25MPa	320,37	19,54	6260,35
Aço CA-50	4,63	1531,18	7089,36
Custo total			13349,72

4.4 – LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL

4.4.1 – Generalidades

Nesta seção são dimensionadas todas as lajes do pavimento considerando a alternativa de laje nervurada unidirecional com preenchimento de blocos de EPS, as vinculações das lajes foram alteradas para que todas estejam simplesmente apoiadas o que dispensará o cálculo da armadura negativa, mas implica em uma maior área de aço necessária para a armadura positiva. Após o dimensionamento com a planilha eletrônica, foi determinado o uso de três seções T diferentes para as lajes, onde a seção 3 foi utilizada para a laje L10, a seção 2 para as lajes L4, L6, L8 e L13 e a seção 1 foi considerada para as demais lajes. A decisão de utilizar apenas três seções diferentes para todo o pavimento foi com intuito de facilitar a execução. A tabela 4.1.1 apresenta as características de cada seção.

4.4.1 – CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DA NERVURA

Seção	-	1	2	3
Marca/tipo	-	EPS		
ie=bf	m	0,65	0,65	0,65
bn (mínimo)	m	0,04	0,04	0,04
bn=bw	m	0,08	0,08	0,08
he	m	0,12	0,17	0,2
be = a = lo	m	0,57	0,57	0,57
Área da nervura (sem capa)	m ²	0,0096	0,014	0,016
Área do material Inerte	m ²	0,0684	0,097	0,114
hc,mínimo (devido ie)	m	0,038	0,038	0,038
hc, mínimo (absoluto)	m	0,04	0,04	0,04
hc=hf	m	0,05	0,05	0,05
ht	m	0,17	0,22	0,25
Ac	m ²	0,0421	0,046	0,0485
ycg	m	0,044	0,057	0,066
Ic,I	m ⁴	7,18E-05	1,56E-04	2,28E-04

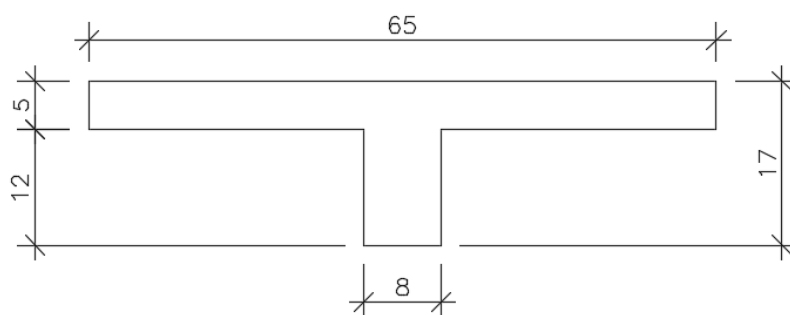


FIGURA 4.4.1 – SEÇÃO 1 LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL

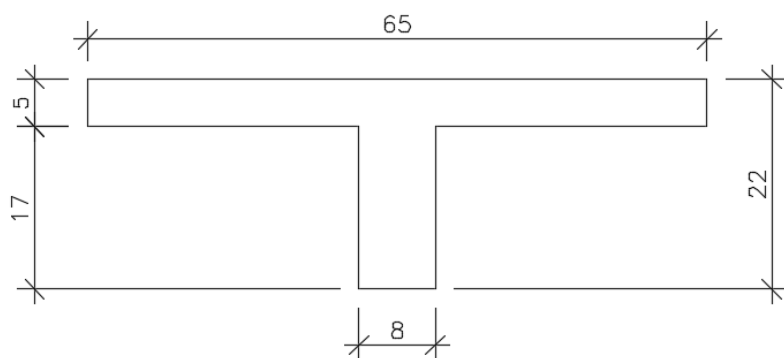


FIGURA 4.4.2 – SEÇÃO 2 LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL

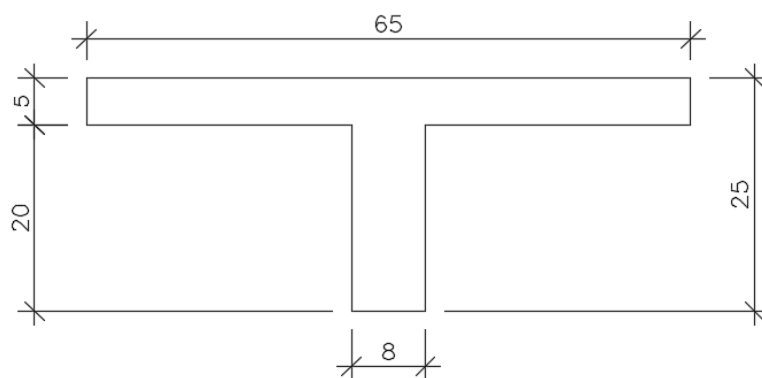


FIGURA 4.4.3 – SEÇÃO 3 LAJE NERVURADA UNIDIRECIONAL

Na tabela 4.4.2 apresenta o vão efetivo para cada laje

TABELA 4.4.2 – VÃO EFETIVO

Laje	L_{0x}	L_{0y}	apoios	ht (cm)	L_x	L_y
1=19	285	290	12	17	295,2	300,2
2=18	272	349	12	17	282,2	359,2
3=21	230,5	290	12	17	240,7	300,2
4=20	249	349	12	22	261	361
5=24	100	289,5	12	17	110,2	299,7
6=23	403	454	12	22	415	466
7	252,5	385	12	17	262,7	395,2
8=25	221	254	12	22	233	266
9=28	100	389,5	12	17	110,2	399,7
10=27	454	475	12	25	466	487
11=26	254	485	12	17	264,2	495,2
12=30	230,5	290	12	17	240,7	300,2
13=29	249	349	12	22	261	361
14=32	285	290	12	17	295,2	300,2
15=31	300	349	12	17	310,2	359,2

16	150	369	12	17	160,2	379,2
17	240	333	12	17	250,2	343,2
22	252,5	385	12	17	262,7	395,2

Seguindo o processo utilizado para laje nervurada bidirecional, será calculado o número de nervuras na direção de Lx e estão distribuídas ao longo de Ly. Assim, na tabela 4.4.3. é apresentado o numero de nervuras e o volume das nervuras sem considerar a capa de concreto acima delas.

TABELA 4.4.3 – CÁLCULO DO NÚMERO DE NERVURAS E VOLUME DAS NERVURAS

Laje -	Lx [m]	Ly [m]	iey [m]	Nnx -	bn [m]	he [m]	Vn [m³]	Ve [m³]
1=19	2,95	3,00	0,65	4	0,08	0,12	0,12	0,95
2=18	2,82	3,59	0,65	5	0,08	0,12	0,17	1,04
3=21	2,41	3,00	0,65	4	0,08	0,12	0,12	0,75
4=20	2,61	3,61	0,65	5	0,08	0,12	0,17	0,96
5=24	1,10	3,00	0,65	4	0,08	0,12	0,12	0,28
6=23	4,15	4,66	0,65	7	0,08	0,17	0,54	2,75
7	2,63	3,95	0,65	6	0,08	0,12	0,23	1,02
8=25	2,33	2,66	0,65	4	0,08	0,12	0,10	0,64
9=28	1,10	4,00	0,65	6	0,08	0,12	0,23	0,30
10=27	4,66	4,87	0,65	7	0,08	0,20	0,68	3,86
11=26	2,64	4,95	0,65	7	0,08	0,12	0,33	1,24
12=30	2,41	3,00	0,65	4	0,08	0,12	0,12	0,75
13=29	2,61	3,61	0,65	5	0,08	0,12	0,17	0,96
14=32	2,95	3,00	0,65	4	0,08	0,12	0,12	0,95
15=31	3,10	3,59	0,65	5	0,08	0,12	0,17	1,16
16	1,60	3,79	0,65	5	0,08	0,12	0,18	0,55
17	2,50	3,43	0,65	5	0,08	0,12	0,16	0,87
22	2,63	3,95	0,65	6	0,08	0,12	0,23	1,02

Com o número de nervuras definidas, pode-se calcular o peso próprio das nervuras distribuído por toda a área da laje.

TABELA 4.4.4 – CÁLCULO DO PESO PRÓPRIO DA LAJE

Laje -	Vn [m³]	Dn [kN/m³]	Pn (nerv) [kN]	pn (nerv) [kN/m²]	pn(mesa) [kN/m²]	p (pp) [kN/m²]
1=19	0,12	25	0,11	0,012	1,25	1,26
2=18	0,17	25	0,18	0,018	1,25	1,27
3=21	0,12	25	0,09	0,012	1,25	1,26
4=20	0,17	25	0,17	0,018	1,25	1,27
5=24	0,12	25	0,03	0,010	1,25	1,26
6=23	0,54	25	1,49	0,077	1,25	1,33
7	0,23	25	0,23	0,022	1,25	1,27

8=25	0,10	25	0,07	0,011	1,25	1,26
9=28	0,23	25	0,07	0,016	1,25	1,27
12=30	0,12	25	0,09	0,012	1,25	1,26
13=29	0,17	25	0,17	0,018	1,25	1,27
14=32	0,12	25	0,11	0,012	1,25	1,26
15=31	0,17	25	0,20	0,018	1,25	1,27
16	0,18	25	0,10	0,016	1,25	1,27
17	0,16	25	0,14	0,017	1,25	1,27
22	0,23	25	0,23	0,022	1,25	1,27

4.4.2 – Estado Limite Último

4.4.2.1 – Momentos Fletores

Como as lajes unidirecionais não seguem as tabelas. O cálculo do momento fletor seguirá a fórmula abaixo:

$$M_d = (p_d * L_x^2) / 8$$

A tabela 4.4.5 apresenta o cálculo do momento fletor máximo por metro para cada laje, e o momento por nervura que é obtido por $M_d * b_f$

TABELA 4.4.5 – CARGAS E MOMENTOS FLETORES COM COBINAÇÃO ÚLTIMA

Laje -	Parede [kN/m]	p_d [kN/m]	M_d [kNm/m]	$M_d/nerv$ [kNm/nerv]
1=19	0,00	6,38	6,95	4,52
2=18	0,00	6,39	6,36	4,13
3=21	0,00	6,38	4,62	3,00
4=20	5,09	13,51	11,51	7,48
5=24	0,00	6,38	0,97	0,63
6=23	0,00	6,47	13,93	9,05
7	0,00	6,39	5,52	3,59
8=25	6,06	14,86	10,08	6,55
9=28	0,00	6,38	0,97	0,63
10=27	0,00	6,52	17,71	11,51
11=26	0,00	6,41	5,59	3,63
12=30	0,00	6,38	4,62	3,00
13=29	5,09	13,51	11,51	7,48
14=32	0,00	6,38	6,95	4,52
15=31	0,00	6,39	7,68	4,99
16	0,00	6,39	2,05	1,33
17	0,00	6,39	5,00	3,25
22	0,00	6,39	5,52	3,59

4.4.2.3 – Armadura Positiva de Flexão

Então se procede com cálculo da área necessária para a seção T de cada laje, durante o processo será verificado se M_d é menor que o momento resistente da mesa da seção ($M_{rd,m}$) para poder tratar a seção como retangular no ELU.

TABELA 4.4.6 – CÁLCULO DA ÁREA DE AÇO NECESSÁRIA

Laje -	M_{dx} / nerv [kNm/nerv]	$M_{rd,m}$	h [cm]	Φ [cm]	d [cm]	x [cm]	x/d	$A_{s,cal}$ [cm ² /nerv]
1=19	4,52	57,22	17	0,80	14,10	0,41	0,029	0,75
2=18	4,13	57,22	17	0,80	14,10	0,38	0,027	0,68
3=21	3,00	57,22	17	0,80	14,10	0,27	0,019	0,49
4=20	7,48	81,89	22	0,80	19,10	0,50	0,026	0,91
5=24	0,63	57,22	17	0,80	14,10	0,06	0,004	0,10
6=23	9,05	81,40	22	1,00	19,00	0,61	0,032	1,11
7	3,59	57,22	17	0,80	14,10	0,33	0,023	0,59
8=25	6,55	81,89	22	0,80	19,10	0,44	0,023	0,80
9=28	0,63	57,22	17	0,80	14,10	0,06	0,004	0,10
10=27	11,51	96,19	25	1,00	22,00	0,67	0,031	1,22
11=26	3,63	57,22	17	0,80	14,10	0,33	0,023	0,60
12=30	3,00	57,22	17	0,80	14,10	0,27	0,019	0,49
13=29	7,48	81,89	22	0,80	19,10	0,50	0,026	0,91
14=32	4,52	57,22	17	0,80	14,10	0,41	0,029	0,75
15=31	4,99	57,22	17	0,80	14,10	0,45	0,032	0,83
16	1,33	57,22	17	0,80	14,10	0,12	0,009	0,22
17	3,25	57,22	17	0,80	14,10	0,29	0,021	0,53
22	3,59	57,22	17	0,80	14,10	0,33	0,023	0,59

Pela relação de x/d se conclui que todas as lajes se encontram no estágio II de deformação.

Na tabela 4.4.7 encontra-se o dimensionamento final da armadura positiva de flexão, de forma que se use apenas duas barras de aço por nervura

TABELA 4.4.7 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA EFETIVA

Laje -	$A_{s,cal}$ [cm ² /nerv]	$A_{s,mín}$ [cm ² /nerv]	$A_{s,ado}$ [cm ² /nerv]	Q ud	$A_{s,ef}$ [cm ² /nerv]	s [cm]	Q ef [ud]	Compr [cm]
1=19	0,75	0,63	0,75	1,48	1,00	3	2	297
2=18	0,68	0,63	0,68	1,36	1,00	3	2	284
3=21	0,49	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	242,5
4=20	0,91	0,69	0,91	1,81	1,00	3	2	261

5=24	0,10	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	112
6=23	1,11	0,69	1,11	1,41	1,57	2	2	415
7	0,59	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	264,5
8=25	0,80	0,69	0,80	1,58	1,00	3	2	233
9=28	0,10	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	112
10=27	1,22	0,73	1,22	1,55	1,57	2	2	466
11=26	0,60	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	266
12=30	0,49	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	242,5
13=29	0,91	0,69	0,91	1,81	1,00	3	2	261
14=32	0,75	0,63	0,75	1,48	1,00	3	2	297
15=31	0,83	0,63	0,83	1,64	1,00	3	2	312
16	0,22	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	162
17	0,53	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	252
22	0,59	0,63	0,63	1,26	1,00	3	2	264,5

4.4.2.4 – Reações de Apoio

Assim como o cálculo dos momentos fletores, o cálculo das reações de apoio não utiliza o mesmo processo utilizado para as lajes maciças e nervuradas bidirecionais, assim é usada a simples formula de reação de apoio para vigas bia apoiadas com carga distribuída “ $R_x = p \cdot L_x / 2$ ”. Na tabela 4.4.8 apresenta as reações de apoio por metro e por nervura.

TABELA 4.4.8 – CÁLCULO DAS REAÇÕES DE APOIO

Laje -	Parede [kN/m]	pd [kN/m]	R _x [kN/m]	R _x /nerv [kN/nerv]
1=19	0,00	6,38	9,42	6,12
2=18	0,00	6,39	9,01	5,86
3=21	0,00	6,38	7,68	4,99
4=20	5,09	13,51	17,64	11,46
5=24	0,00	6,38	3,51	2,28
6=23	0,00	6,47	13,43	8,73
7	0,00	6,39	8,40	5,46
8=25	6,06	14,86	17,31	11,25
9=28	0,00	6,38	3,52	2,29
10=27	0,00	6,52	15,20	9,88
11=26	0,00	6,41	8,46	5,50
12=30	0,00	6,38	7,68	4,99
13=29	5,09	13,51	17,64	11,46
14=32	0,00	6,38	9,42	6,12
15=31	0,00	6,39	9,91	6,44
16	0,00	6,39	5,12	3,32

17	0,00	6,39	7,99	5,19
22	0,00	6,39	8,40	5,46

4.4.2.5 – Cisalhamento

A verificação do esforço de cisalhamento segue os mesmos procedimentos teóricos utilizados anteriormente em laje maciça e nervurada bidirecional.

TABELA 4.4.9 – VERIFICAÇÃO DO ESFORÇO DE CISALHAMENTO

Laje -	d [m]	k -	A(S1) [m ² /nerv]	p(1) -	V(Rd1) [kN/nerv]	V(Rd2) [kN/nerv]	V(sd) [kN/nerv]	Dentro dos limites?
1=19	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	6,12	OK
2=18	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	5,86	OK
3=21	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	4,99	OK
4=20	0,191	1,409	1,00E-04	5,26E-04	68,48	498,82	17,64	OK
5=24	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	3,51	OK
6=23	0,19	1,41	1,57E-04	8,26E-04	68,84	496,21	13,43	OK
7	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	8,40	OK
8=25	0,191	1,409	1,00E-04	5,26E-04	68,48	498,82	17,31	OK
9=28	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	3,52	OK
10=27	0,22	1,38	1,57E-04	7,14E-04	77,73	574,55	15,20	OK
11=26	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	8,46	OK
12=30	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	7,68	OK
13=29	0,191	1,409	1,00E-04	5,26E-04	68,48	498,82	17,64	OK
14=32	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	9,42	OK
15=31	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	9,91	OK
16	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	5,12	OK
17	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	7,99	OK
22	0,141	1,459	1,00E-04	7,13E-04	52,67	368,24	8,40	OK

Portanto, é dispensado o uso de armadura de cisalhamento nas nervuras.

4.4.3 – Estado Limite de Serviço

4.4.3.1 – Verificação da Fissuração

Seguindo o mesmo procedimento utilizado nos outros tipos de laje, é conferido se ocorre a fissuração nas lajes comparando o momento de fissuração ($M_{r,m}$) com o momento devido a combinação frequente de serviço (M_{freq}) e o momento devido a combinação quase permanente (M_a).

TABELA 4.4.10 – CÁLCULO DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO

Seção	α	$I(c,I)$ [m ⁴]	$f(ck,m)$ [kPa]	$h(laje)$ [m]	$y(t)$ [m]	$M_{r,m}$ [kN*m]
1	1,2	7,18E-05	2565	0,17	0,126	1,76
2	1,2	1,56E-04	2565	0,22	0,163	2,95
3	1,2	2,28E-04	2565	0,25	0,184	3,81

TABELA 4.4.11 – VERIFICAÇÃO DA FISSURAÇÃO

Laje	M_r [kNm]	p (freq.)/nerv [kN/m]	M (freq) [kNm/nerv]	Fissura?	p (freq.)/nerv [kN/m]	M (freq) [kNm/nerv]	Fissura?
1=19	1,76	2,46	2,68	Sim	2,26	2,46	Sim
2=18	1,76	2,47	2,45	Sim	2,27	2,26	Sim
3=21	1,76	2,46	1,78	Sim	2,26	1,64	Não
4=20	2,95	5,77	4,92	Sim	5,57	4,75	Sim
5=24	1,76	2,46	0,37	Não	2,26	0,34	Não
6=23	2,95	2,50	5,39	Sim	2,30	4,96	Sim
7	1,76	2,47	2,13	Sim	2,27	1,96	Sim
8=25	1,76	6,40	4,34	Sim	6,20	4,21	Sim
9=28	1,76	2,46	0,37	Não	2,26	0,34	Não
10=27	3,81	2,53	6,87	Sim	2,33	6,32	Sim
11=26	1,76	2,47	2,16	Sim	2,27	1,98	Sim
12=30	1,76	2,46	1,78	Sim	2,26	1,64	Não
13=29	2,95	5,77	4,92	Sim	5,57	4,75	Sim
14=32	1,76	2,46	2,68	Sim	2,26	2,46	Sim
15=31	1,76	2,47	2,97	Sim	2,27	2,73	Sim
16	1,76	2,46	0,79	Não	2,26	0,73	Não
17	1,76	2,47	1,93	Sim	2,27	1,77	Sim
22	1,76	2,47	2,13	Sim	2,27	1,96	Sim

Portanto, na combinação frequente de serviço não ocorrerá fissuração nas lajes L5, L9 e L16, e na combinação quase permanente de serviço não ocorrerá fissuração nas lajes L3, L5, L9, L12 e L16.

4.4.3.2 – Fissuração

Aqui seguiremos os mesmos passos utilizados na lajes maciça e nervurada bidirecional, primeiramente será calculado o momento de inércia no estágio dois puro da laje, como só é considerado momento no vão das lajes devido a vinculação adotada. Só será necessário calcular o momento de inércia no vão da menor direção. No cálculo do momento inércia foram seguinte valores são característicos de todas as lajes:

- $b_w = 0,08 \text{ m}$
- $h_f = 0,05 \text{ m}$
- $b_f = 0,65 \text{ m}$
- $\alpha_e = 210000 \text{ Mpa} / 23800 \text{ Mpa} = 8,8235$

TABELA 4.4.12 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA NO ESTÁDIO II PURO

Laje	a1 [m]	As [m²]	a2 [m²]	d [m]	a3 [m³]	X(II) ado [m]	I(c,II) [m⁴]
L1	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L2	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L3	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L4	0,04	1,00E-04	0,029387	0,191	-0,00088	0,0289	2,85E-05
L6	0,04	1,57E-04	0,029885	0,190	-0,00098	0,0313	4,15E-05
L7	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L8	0,04	1,37E-04	0,029711	0,140	-0,00088	0,0286	2,01E-05
L10	0,04	1,57E-04	0,029885	0,220	-0,00102	0,0326	5,62E-05
L11	0,04	1,26E-04	0,029609	0,141	-0,00087	0,0283	1,90E-05
L12	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L13	0,04	1,00E-04	0,029387	0,191	-0,00088	0,0289	2,85E-05
L14	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L15	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L17	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05
L22	0,04	1,00E-04	0,029387	0,141	-0,00084	0,0275	1,59E-05

A área de concreto protegida segue as mesmas condições que foram estabelecidas para a laje nervurada bidirecional, assim $A_{cr} = D_x * (D_{y1} + D_{y2})$. Além disso, os seguintes valores característicos que foram utilizados no cálculo de abertura de fissuração valem para todas as lajes:

- $b_w = 0,08 \text{ m}$
- $\eta_i = 2,25$ (barra nervurada)
- $E_{si} = 210000000 \text{ kPa}$
- $F_{ctk,m} = 2565 \text{ kPa}$

TABELA 4.4.13 – DADOS INICIAIS PARA O CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAS

Laje	M(d,freq) [kN*m/nerv]	I(c,II) [m⁴]	d [m]	d'' [m]	x(II) [m]	y(si) [m]	σ (si) [kPa]	Φ_i [m]
L1	2,68	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,69E+05	0,0080
L2	2,45	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,54E+05	0,0080
L3	1,78	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,12E+05	0,0080

L4	4,92	2,85E-05	0,1910	0,029	0,0289	0,1621	2,47E+05	0,0080
L6	5,39	4,15E-05	0,1900	0,03	0,0313	0,1587	1,82E+05	0,0100
L7	2,13	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,34E+05	0,0080
L8	4,34	4,23E-05	0,1910	0,029	0,0314	0,1596	1,44E+05	0,0080
L10	6,87	5,62E-05	0,2200	0,03	0,0326	0,1874	2,02E+05	0,0100
L11	2,16	1,90E-05	0,1410	0,029	0,0283	0,1127	1,13E+05	0,0080
L12	1,78	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,12E+05	0,0080
L13	4,92	2,85E-05	0,1910	0,029	0,0289	0,1621	2,47E+05	0,0080
L14	2,68	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,69E+05	0,0080
L15	2,97	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,87E+05	0,0080
L17	1,93	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,21E+05	0,0080
L22	2,13	1,59E-05	0,1410	0,029	0,0275	0,1135	1,34E+05	0,0080

TABELA 4.4.14 – CÁLCULO DA ÁREA PROTEGIDA E TAXA DE ARMADURA

Laje	D(x) [m]	D(y1) [m]	D(y2) [m]	As(un) [m²]	A(cr) [m²]	p(ri) -
L1	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L2	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L3	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L4	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L6	0,04	0,075	0,03	7,85E-05	4,20E-03	0,01869
L7	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L8	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L10	0,04	0,075	0,03	7,85E-05	4,20E-03	0,01869
L11	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L12	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L13	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L14	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L15	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L17	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112
L22	0,04	0,06	0,029	5,02E-05	3,56E-03	0,014112

TABELA 4.4.15 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DAS LAJES

Laje	w(1) [m]	w(2) [m]	w [mm]	w(limite) [mm]	Dentro do limite?
L1	4,51E-05	7,51E-05	0,05	0,3	Sim
L2	3,78E-05	6,87E-05	0,04	0,3	Sim
L3	1,99E-05	4,99E-05	0,02	0,3	Sim
L4	9,64E-05	1,10E-04	0,10	0,3	Sim

L6	6,54E-05	7,97E-05	0,07	0,3	Sim
L7	2,84E-05	5,96E-05	0,03	0,3	Sim
L8	3,30E-05	6,42E-05	0,03	0,3	Sim
L10	8,09E-05	8,86E-05	0,08	0,3	Sim
L11	2,03E-05	5,03E-05	0,02	0,3	Sim
L12	1,99E-05	4,99E-05	0,02	0,3	Sim
L13	9,64E-05	1,10E-04	0,10	0,3	Sim
L14	4,51E-05	7,51E-05	0,05	0,3	Sim
L15	5,52E-05	8,30E-05	0,06	0,3	Sim
L17	2,33E-05	5,40E-05	0,02	0,3	Sim
L22	2,84E-05	5,96E-05	0,03	0,3	Sim

4.4.3.3 – Flecha

O cálculo da flecha será executado considerando a laje como uma viga bi-apoiada, assim pode ser usado a formula abaixo para obter a flecha elástica no meio do vão (BEER, et al., 2005).

$$F = (5 * p * L^4) / 384 * E * I$$

Sendo que para as lajes que ocorrerá fissuração, deverá ser utilizado o momento de inércia equivalente e as que não fissuram utilizarão o momento de inércia no estágio I

O cálculo do momento de inércia equivalente segue o mesmo processo utilizado na laje nervurada bidirecional, que está apresentado na tabela 4.4.16

TABELA 4.4.16 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA EQUIVALENTE

Lajes	Mr,m [kN*m/nerv]	Ma [kN*m/nerv]	Mr,m/Ma -	I(c,I) [m^4]	I(c,II) [m^4]	I(ceq) [m^4]
L1	1,76	2,46	0,71	7,18E-05	1,59E-05	3,63E-05
L2	1,76	2,26	0,78	7,18E-05	1,59E-05	4,25E-05
L4	2,95	4,75	0,62	1,56E-04	2,85E-05	5,89E-05
L6	2,95	4,96	0,59	1,56E-04	4,15E-05	6,54E-05
L7	1,76	1,96	0,90	7,18E-05	1,59E-05	5,66E-05
L8	2,95	4,21	0,70	1,56E-04	4,23E-05	8,12E-05
L10	3,81	6,32	0,60	2,28E-04	5,62E-05	9,38E-05
L11	1,76	1,98	0,89	7,18E-05	1,90E-05	5,58E-05
L13	2,95	4,75	0,62	1,56E-04	2,85E-05	5,89E-05
L14	1,76	2,46	0,71	7,18E-05	1,59E-05	3,63E-05
L15	1,76	2,73	0,65	7,18E-05	1,59E-05	3,10E-05
L17	1,76	1,77	0,99	7,18E-05	1,59E-05	7,07E-05
L22	1,76	1,96	0,90	7,18E-05	1,59E-05	5,66E-05

Como neste caso é considerada a vinculação das lajes como biapoiadas, não há momentos atuantes nos apoios e o momento de inercia equivalente considerando o momento máximo do vão já vale para todo comprimento da laje.

Na tabela 4.4.17 é apresentado o calculo da flecha imediata para todas as lajes

TABELA 4.4.17 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A DEFORMAÇÃO ELÁSTICA E FISSURAÇÃO

Lajes	p/nerv [kN/m]	L [m]	Ecs [kPa]	I(ceq) [m ⁴]	f(elástica+fissuração) [m]
L1	2,26	2,952	2,38E+07	3,63E-05	2,59E-03
L2	2,27	2,822	2,38E+07	4,25E-05	1,85E-03
L3	2,26	2,407	2,38E+07	7,18E-05	5,78E-04
L4	5,57	2,61	2,38E+07	5,89E-05	2,40E-03
L5	2,26	1,102	2,38E+07	7,18E-05	2,54E-05
L6	2,30	4,15	2,38E+07	6,54E-05	5,72E-03
L7	2,27	2,627	2,38E+07	5,66E-05	1,04E-03
L8	6,20	2,33	2,38E+07	8,12E-05	1,23E-03
L9	2,26	1,102	2,38E+07	7,18E-05	2,54E-05
L10	2,33	4,66	2,38E+07	9,38E-05	6,41E-03
L11	2,27	2,642	2,38E+07	5,58E-05	1,09E-03
L12	2,26	2,407	2,38E+07	7,18E-05	5,78E-04
L13	5,57	2,61	2,38E+07	5,89E-05	2,40E-03
L14	2,26	2,952	2,38E+07	3,63E-05	2,59E-03
L15	2,27	3,102	2,38E+07	3,10E-05	3,71E-03
L16	2,26	1,602	2,38E+07	7,18E-05	1,14E-04
L17	2,27	2,502	2,38E+07	7,07E-05	6,87E-04
L22	2,27	2,627	2,38E+07	5,66E-05	1,04E-03

Os parâmetros considerados para contribuição continuam os mesmos adotados anteriormente e seu cálculo segue na tabela 4.4.18

TABELA 4.4.18 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO A FLUÊNCIA DOS MATERIAIS

Lajes	αf -	f(elást + fiss) [m]	f(fluência) [m]	f(elas+fiss+flu) [m]	f(elas+fiss+flu) [mm]	Limite: L/250 [mm]
L1	1,32	2,59E-03	3,42E-03	6,01E-03	6,01	11,81
L2	1,32	1,85E-03	2,44E-03	4,29E-03	4,29	11,29
L3	1,32	5,78E-04	7,64E-04	1,34E-03	1,34	9,63
L4	1,32	2,40E-03	3,18E-03	5,58E-03	5,58	10,44
L5	1,32	2,54E-05	3,35E-05	5,89E-05	0,06	4,41

L6	1,32	5,72E-03	7,55E-03	1,33E-02	13,27	16,60
L7	1,32	1,04E-03	1,38E-03	2,42E-03	2,42	10,51
L8	1,32	1,23E-03	1,63E-03	2,86E-03	2,86	9,32
L9	1,32	2,54E-05	3,36E-05	5,90E-05	0,06	4,41
L10	1,32	6,41E-03	8,47E-03	1,49E-02	14,88	18,64
L11	1,32	1,09E-03	1,43E-03	2,52E-03	2,52	10,57
L12	1,32	5,78E-04	7,64E-04	1,34E-03	1,34	9,63
L13	1,32	2,40E-03	3,18E-03	5,58E-03	5,58	10,44
L14	1,32	2,59E-03	3,42E-03	6,01E-03	6,01	11,81
L15	1,32	3,71E-03	4,90E-03	8,60E-03	8,60	12,41
L16	1,32	1,14E-04	1,50E-04	2,64E-04	0,26	6,41
L17	1,32	6,87E-04	9,08E-04	1,59E-03	1,59	10,01
L22	1,32	1,04E-03	1,38E-03	2,42E-03	2,42	10,51

A flecha foi o fator determinante para a escolha da altura das seções a serem utilizadas, nota-se que muitas das flechas da seção 1 estão com muita folga mas isso aconteceu com o intuito de deixar a montagem da laje de forma mais pratica adotando uma das seções para o maior número de lajes que for possível e a laje L15 foi a mais próxima do limite com uma folga de 3,81 mm. Quanto a seção 2, a L6 foi a laje determinante para a altura seção possuindo uma folga de 3,33 mm do limite de deformação. Por fim, a seção 3 foi utilizada somente para a laje L10 por ela demandar uma altura maior que chegou numa folga de 3,76 mm do seu limite de deformação de flecha.

Ainda na verificação de flechas, é calculado agora a flecha considerando a carga vertical de uso para verificação de vibrações indesejadas.

TABELA 4.4.19 – CÁLCULO DA FLECHA DEVIDO À CARGA VERTICAL DE USO

Lajes	p [kN/m ²]	L [m]	Ecs [kPa]	I(ceq) [m ⁴]	f(vibração) [m]	f(vibração) [mm]	Limite: L/350 [mm]
L1	1,30	2,95	2,38E+07	3,63E-05	1,49E-03	1,49	8,43
L2	1,30	2,82	2,38E+07	4,25E-05	1,06E-03	1,06	8,06
L3	1,30	2,41	2,38E+07	7,18E-05	3,32E-04	0,33	6,88
L4	1,30	2,61	2,38E+07	5,89E-05	5,61E-04	0,56	7,46
L5	1,30	1,10	2,38E+07	7,18E-05	1,46E-05	0,01	3,15
L6	1,30	4,15	2,38E+07	6,54E-05	3,23E-03	3,23	11,86
L7	1,30	2,63	2,38E+07	5,66E-05	5,99E-04	0,60	7,51
L8	1,30	2,33	2,38E+07	8,12E-05	2,58E-04	0,26	6,66
L9	1,30	1,10	2,38E+07	7,18E-05	1,46E-05	0,01	3,15
L10	1,30	4,66	2,38E+07	9,38E-05	3,58E-03	3,58	13,31
L11	1,30	2,64	2,38E+07	5,58E-05	6,21E-04	0,62	7,55
L12	1,30	2,41	2,38E+07	7,18E-05	3,32E-04	0,33	6,88

L13	1,30	2,61	2,38E+07	5,89E-05	5,61E-04	0,56	7,46
L14	1,30	2,95	2,38E+07	3,63E-05	1,49E-03	1,49	8,43
L15	1,30	3,10	2,38E+07	3,10E-05	2,13E-03	2,13	8,86
L16	1,30	1,60	2,38E+07	7,18E-05	6,52E-05	0,07	4,58
L17	1,30	2,50	2,38E+07	7,07E-05	3,94E-04	0,39	7,15
L22	1,30	2,63	2,38E+07	5,66E-05	5,99E-04	0,60	7,51

4.4.4 – Armadura de Distribuição

A armadura de distribuição da mesa da laje nervurada unidirecional deve ser maior igual que: 20% da armadura por metro utilizada nas nervuras; A armadura mínima por metro das nervuras; e valor absoluto de 0,9 cm² por metro. A tabela 4.4.20 apresenta este dimensionamento

TABELA 4.4.20 – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO

Laje	Φ [cm]	As/m sec [cm ²]	0,2*As [cm ²]	As/m abs [cm ²]	Asmin/m [cm ²]	As/m ef [cm ²]	s ef [cm]	Qx [um]	Qy [um]
L1	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	15	15
L2	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	18	14
L3	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	15	12
L4	0,5	1,55	0,31	0,9	0,53	0,9	21	18	13
L5	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	15	6
L6	0,5	2,42	0,48	0,9	0,53	0,9	21	23	20
L7	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	19	13
L8	0,5	1,55	0,31	0,9	0,53	0,9	21	13	12
L9	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	20	6
L10	0,5	2,42	0,48	0,9	0,56	0,9	21	24	23
L11	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	24	13
L12	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	15	12
L13	0,5	1,55	0,31	0,9	0,64	0,9	21	18	13
L14	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	15	15
L15	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	18	15
L16	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	19	8
L17	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	17	12
L22	0,5	1,55	0,31	0,9	0,49	0,9	21	19	13

4.4.5 – Quantitativo e custo dos materiais

Novamente são quantificados o volume total de concreto e peso de aço dimensionado para as lajes do pavimento

O volume de concreto considerando todas as lajes do pavimento foi quantificado o consumo de 23,01 m³. Já o peso de aço quantificado foi de 557,61 kg para todas as lajes do pavimento. A tabela seguinte apresenta os consumos e custos de cada material no total.

TABELA 4.4.21 – CUSTO DOS MATERIAIS COM AS REPETIÇÕES

Produto	Custo unitário	Consumo	Custo (R\$)
Concreto 25MPa	320,37	23,01	7370,63
Aço CA-50	4,63	1427,49	6609,29
Custo total			13979,92

Logo se percebe que ocorreu um aumento no consumo de concreto devido as maiores seções adotadas pela laje nervurada unidirecional no entanto ocorreu uma redução na quantidade de aço utilizada.

4.5 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS DE LAJES

Dimensionadas os três tipos de lajes consideradas neste trabalho, será feito o comparativo entre elas utilizando o quantitativo que considera o consumo de concreto e aço de todas as lajes do pavimento aqui estudado. A tabela seguinte apresenta um resumo do quantitativo considerando laje maciça, laje nervurada bi-direcional e laje nervurada unidirecional.

TABELA 4.5.1 – RESUMO DO QUANTITATIVO

Tipo de laje	Concreto (m³)	Aço (kg)	Custo total (R\$)
Maciça	25,28	1648,59	15733,32
Nervurada Bi-direcional	19,54	1531,18	13349,72
Nervurada Unidirecional	23,01	1427,49	13979,92

As figuras 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.3 apresentam essa comparação graficamente

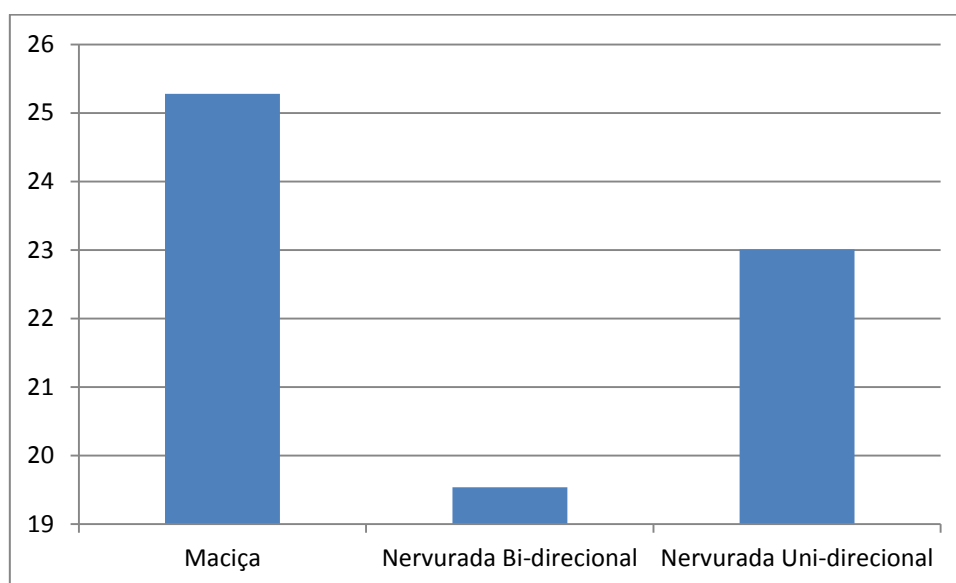


FIGURA 4.5.1 – CONSUMO DE CONCRETO EM M³ DE TODAS AS LAJES DO PAVIMENTO

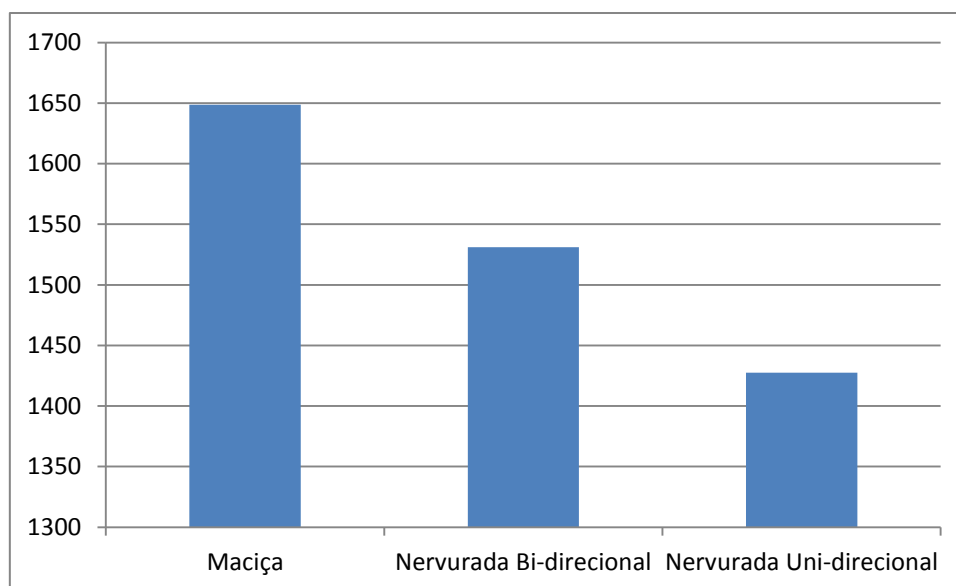


FIGURA 4.5.2 – CONSUMO EM KG DO AÇOS DE TODAS AS LAJES DO PAVIMENTO

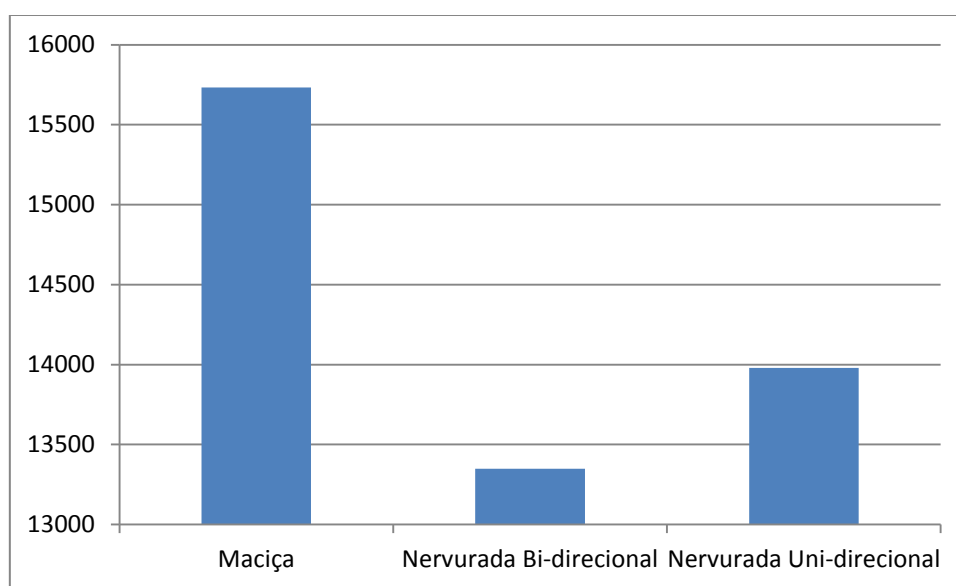


FIGURA 4.5.3 – CUSTO TOTAL DO AÇO E DO CONCRETO

Como os vãos do pavimento eram consideravelmente pequenos, já era esperado que a utilização de laje maciça não fosse recomendável pois mesmo com as lajes sendo dimensionadas em uma altura quase mínima de 8 cm, a estrutura ficou muito folgada com pequenos esforços que a armadura necessária dava abaixo do mínimo e pequenas deformações nas flechas.

Assim, na adoção de laje nervurada já era esperado que o consumo de concreto e aço diminuísse tanto na utilização de laje nervurada bidirecional e unidirecional. Isso ocorre devido ao menor peso próprio das lajes que gera menores esforços, consumindo assim menos concreto e aço.

Comparando a laje maciça com a nervurada bidirecional percebe-se que ocorreu uma redução considerável no consumo de concreto (5,74 m³) que poderia representar na economia de um caminhão a menos de concreto, a comparação entre os dois apresenta também a redução esperada do consumo do aço no entanto fica claro que essa economia não foi tão significativa quanto a do concreto.

Ao comparar a laje nervurada bidirecional com a unidirecional percebe-se a economia de aço que a unidirecional proporciona um dos fatores determinantes para essa economia foi o fato da unidirecional ser considerada bi-apoiada que resultou no desuso da armadura negativa que está sendo usada na laje nervurada bidirecional. Mas mesmo com a menor quantidade de nervuras, a laje nervurada unidirecional apresentou um maior consumo de concreto devido as maiores alturas utilizadas em suas seções para atender a deformação máxima das flechas.

Portanto, devido ao menor custo gerado pela maior economia de concreto entre as opções de apresentadas a laje nervurada bidirecional foi considerada a opção ideal para esta situação. O fato de utilizar uma única seção ou altura para todo o pavimento já gera um maior rendimento na execução e economia na fabricação de formas.

4.6 – DIMENSIONAMENTO DA V43

4.6.1 – Estado Limite Último

A viga 43 é dividida em quatro trechos nomeados da esquerda para direita, 43a, 43b, 43c e 43d, os apoios serão numerados da esquerda para direita e a viga foi pré-dimensionada com a seção 12x40, como a opção de laje escolhida foi a de nervurada bidirecional, os carregamentos atuantes consideram as reações desta alternativa sobre as vigas.

O trecho 43a possui um vão efetivo de 4,15 m e um de seus apoios é um pilar de extremidade, portanto será considerado a influencia de solidariedade do pilar 32. Este trecho da viga serve apoio para as lajes L7 e 16, o que resulta uma carga distribuída de 18,66N/m considerando o peso próprio da viga.

O trecho 43b possui um vão efetivo e 2,57 m, recebe as reações de apoio das lajes L8 e L17, e possui a carga distribuída de 20,91kN/m ao longo do seu trecho

O trecho 43c tem vão efetivo de 4,3m, recebe a reação de apoio da laje L11, que resulta na carga distribuída de 14,06 kN/m ao logo do seu trecho, e além disso possui a carga pontual de -9,3 kN por servir de apoio para a viga 16

O trecho 43d é um trecho em balanço de vão efetivo de 1,15 m, recebendo a reação de L11 e a carga pontual por servir do apoio para Viga 9. Assim o trecho possui a carga distribuída de 14,06 kN/m e a carga pontual de 7,9kN

Abaixo segue a modelagem utilizada no ftool, os gráficos de força de cisalhamento e de momento fletor.

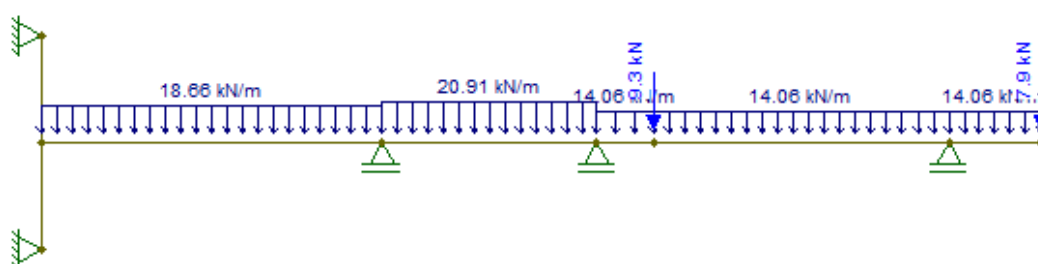


FIGURA 4.6.1 – CARREGAMENTOS DE CÁLCULO NO ELU VIGA 43

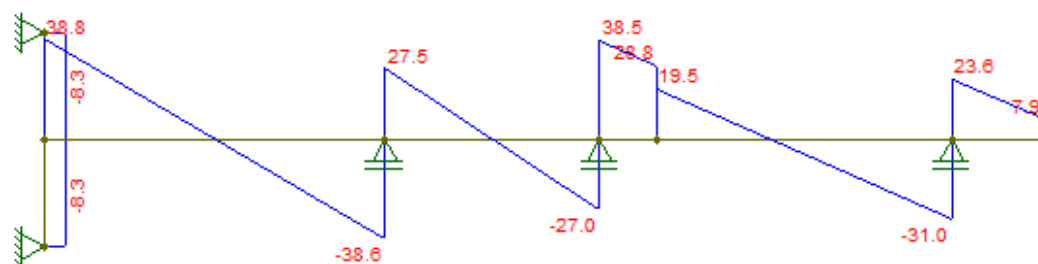


FIGURA 4.6.2 – DIAGRAMA DE ESFORÇO CORTANTE NO ELU DA VIGA 43

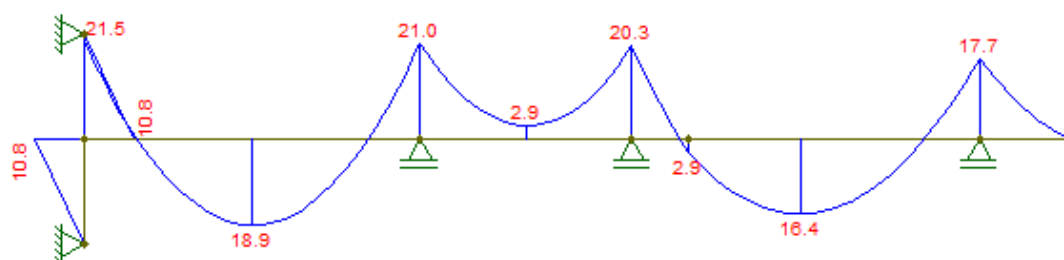


FIGURA 4.6.3 – DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES NO ELU DA VIGA 43

4.6.2 – Armadura de Flexão

Momento máximo da viga = $M_{\text{Apoio 1}} = 21,5 \text{ kN.m}$

Considerando a viga com $h = 40$, $M_{\text{mín}} = 8,54 \text{ kN.m}$

Momento de Engaste Perfeito no trecho 43a, $M_{\text{ep}} = 22,60 \text{ kN.m}$

Portanto será inicialmente dimensionada a viga considerando momento de engaste perfeito. Assim, é definida uma distância inicial do centro da armadura considerando a altura máxima e mínima possível no domínio 3.

$$d_{\text{max}} = \text{raiz}(22,60 / (0,16 * 17857 * 0,12)) = 0,2567 \text{ m}$$

$$d_{\text{min}} = \text{raiz}(22,60 / (0,25 * 17857 * 0,12)) = 0,2054 \text{ m}$$

Assim, será adotado $d = 22 \text{ cm}$. Calculando a linha neutra, $x = 8,30 \text{ cm}$ e, portanto $x/d = 0,377$ como $x/d > 0,259$ está no Domínio 3 de deformação.

$$\text{Armadura de aço necessária} = A_s = 2,78 \text{ cm}^2$$

$$\text{Armadura mínima (ainda considerando seção } 12 \times 40) = 0,72 \text{ cm}^2$$

Considerando a bitola da armadura como $\phi 10 \text{ mm}$, serão necessárias 4 barras no total.

Adotando o uso de brita 2 ($D_{\max} = 25 \text{ mm}$) e considerando estribos de $\phi 5 \text{ mm}$, é determinado que o uso de duas barras por camada, assim serão duas barras na primeira camada e duas na segunda.

Com isto, através da simetria, é possível calcular a distância do centro e armadura até a borda inferior da viga, $d'' = c + \phi + e_v/2 = 6 \text{ cm}$.

Somando d'' com o d adotado inicialmente, é definida a altura necessária da viga $h_{\text{nec}} = 28 \text{ cm}$. Com isto, é adotada a altura da viga como $h = 30 \text{ cm}$.

Assim, é facilmente calculado os valores do dimensionamento efetivo da viga:

$$A_{s,\text{efe}} = 3,14 \text{ cm}^2$$

$$d_{\text{efe}} = 24 \text{ cm}$$

$$x_{\text{efe}} = 9,37 \text{ cm}$$

$$x/d_{\text{efe}} = 0,390 \rightarrow \text{Domínio 3 de deformação}$$

$$\text{Momento resistente: } M_{Rd} = 27,65 \text{ kN.m} > M_d = 22,60 \text{ kN.m}$$

$$\varepsilon_c = 3,50\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = 5,47\text{‰}$$

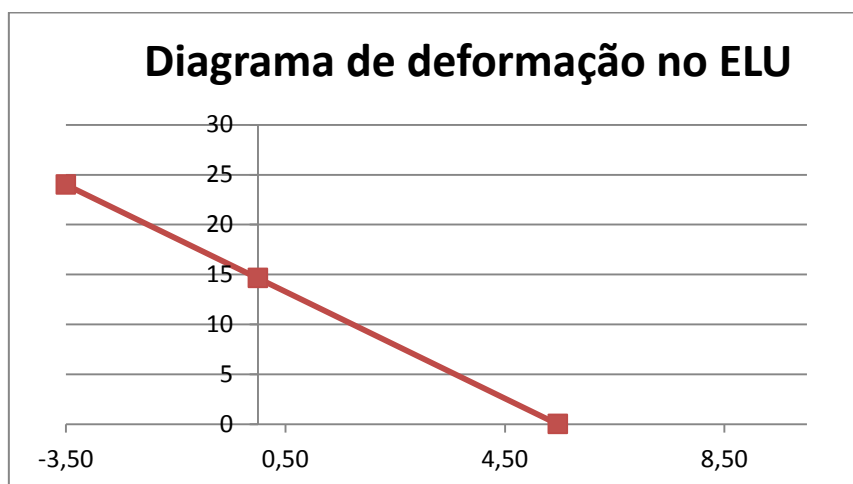


FIGURA 4.6.4 – DIAGRAMA DE DEFORMAÇÃO DO VÃO 1 DA VIGA 43

Assim, como a altura possui um valor constante ao longo da viga, serão dimensionadas as armaduras para os outros momentos considerando $h = 30 \text{ cm}$.

Momento negativo no apoio 1: $M_d = 21,5 \text{ Kn}$, e o novo momento mínimo agora será: $M_{d,\text{min}} = 4,8 \text{ kN.m}$

Como h já está definido, o valor inicial de d será considerado agora como $d = 0,9 \cdot h$, portanto $d = 27$ cm.

Assim, é calculada a posição da linha neutra $x = 8,3$ cm e a relação $x/d = 0,22$. Portanto inicialmente a viga se encontra no Domínio 2 de deformação. Seguindo os mesmos processos de antes é calculado a área de aço necessária, a área mínima e o número de barras necessárias ao definir a bitola do aço.

$$A_s = 2,01 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,54 \text{ cm}^2$$

$$\phi 10 \text{ mm} \rightarrow n = 3 \text{ barras}$$

Considerando as mesmas características da dimensão do agregado e bitola de estribos, é definido o máximo de duas barras por camada, assim a primeira camada possuirá duas barras e a segunda camada apenas uma barra, portanto $d'' = 5,5$ cm. Assim considerando $h = 30$ cm é possível calcular os valores efetivos do dimensionamento:

$$A_{s,\text{efe}} = 2,36 \text{ cm}^2$$

$$d_{\text{efe}} = 24,5 \text{ cm}$$

$$x_{\text{efe}} = 0,287 \text{ cm}$$

$$x/d_{\text{efe}} = 0,287 \rightarrow \text{Portanto a peça passa a estar no domínio 3 de deformação}$$

$$MR_d = 22,21 \text{ kN.m} > M_d = 21,5 \text{ kN.m}$$

$$\varepsilon_c = 3,50\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = 8,70\text{‰}$$

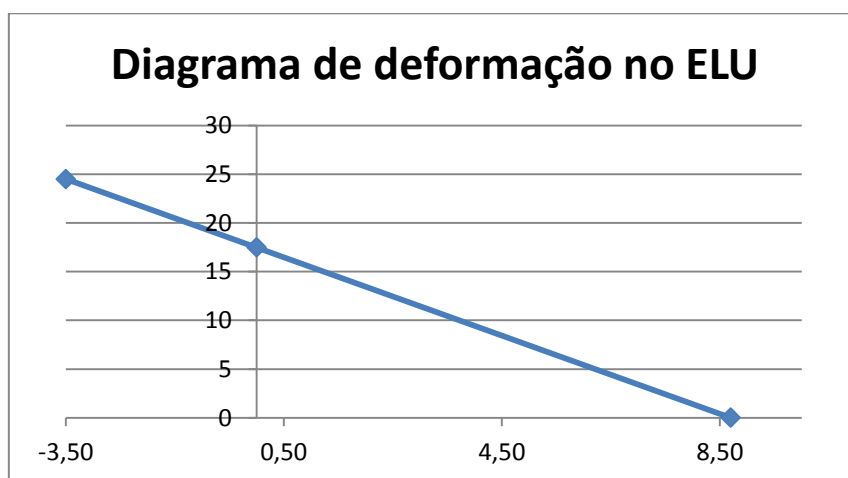


FIGURA 4.6.4 – DIAGRAMA DE DEFORMAÇÃO NO APOIO 1 DA VIGA 43

Assim, como este processo se repete para o dimensionamento nas outras posições da Viga 43, a tabela abaixo resume os valores efetivos do dimensionamento.

TABELA 4.6.1 – ARMADURA DE FLEXÃO DA VIGA 43

		Apoio 1	Vão 1	Apoio 2	Vão 3	Apoio 3	Vão 4	Apoio 5
Md	kN.m	21,50	22,60	21,00	4,80	20,3	16,40	17,7
Φ	cm	1	1	1	0,63	1	0,8	0,8
n	-	3	4	3	2	3	4	4
As,efe	cm ²	2,36	3,14	2,36	0,62	2,36	2,01	2,01
d, efe	cm	24,50	24,00	24,50	26,06	24,50	25,10	25,10
x, efe	cm	7,03	9,37	7,03	1,86	7,03	6,00	6,00
x/d efe	-	0,287	0,390	0,287	0,071	0,287	0,239	0,239
Dom		3	3	3	2	3	2	2
Mrd	kN.m	22,21	27,65	22,21	6,86	22,21	19,84	19,84
ϵ_c	%o	3,50	3,50	3,50	0,77	3,50	3,14	3,14
ϵ_s	%o	8,70	5,47	8,70	10,00	8,70	10,00	10,00

4.6.3 – Armadura de cisalhamento

Na armadura transversal serão utilizadas barras de CA-60 com 5 mm, assim será dimensionada a armadura para cada trecho da viga 4. O trecho 1 possui $d = 24$ cm e $V_{sd} = 38,8$ kN, e com estes dados será utilizado o modelo II de cálculo para determinar VR_{d2} , V_c e V_{sw} .

$$\alpha_2 = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 25 / 250 = 0,9$$

$$VR_{d2,II} = 0,54 * \alpha_2 * f_{cd} * b_w * d * \sin^2 \theta * (\cot \alpha + \cot \theta), \text{ Considerando } \theta = 30^\circ \text{ e } \alpha = 90^\circ$$

$$VR_{d2,II} = 0,54 * 0,9 * (2,5 / 1,4) * 12 * 24 * \sin^2(90^\circ) * (\cot(90^\circ) + \cot(30^\circ)) = 108,2 \text{ kN}$$

$$V_{c,I} = 0,6 * f_{ctd} * b_w * d = 0,6 * 0,128 * 12 * 24 = 22,1 \text{ kN}$$

$V_{c,I} < V_{sd}$ então será considerado a interpolação proposta pela NBR 6118:2014 no cálculo de $V_{c,II}$

$$V_{c,II} = V_{c,I} * (VR_{d2,II} - V_{sd}) / (VR_{d2,II} - V_{c,I}) = 22,1 * (108,2 - 38,8) / (108,2 - 22,1) = 17,9 \text{ kN}$$

$$V_{sw} = V_{sd} - V_{c,II} = 38,8 - 17,9 = 20,9 \text{ kN}$$

$$A_{sw} / s = V_{sw} / (0,9 * d * f_{ydw} * (\cot \alpha + \cot \theta) * \sin \alpha), \text{ sendo } f_{ydw} = f_{yd} \leq 435 \text{ MPa}$$

$$A_{sw} / s = 20,9 / (0,9 * 24 * (43,5) * (\cot(90^\circ) + \cot(30^\circ)) * \sin(90^\circ)) = 1,29 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$V_{sd} / VR_{d2} = 38,8 / 108,2 = 0,36 < 0,67$$

$$s_{\max} = 0,6 * d = 0,6 * 24 = 14,4 \text{ cm} \leq 30 \text{ cm OK!}$$

$$s = A_{sun} / A_{sw} = 0,25^3 * \pi / 1,29 = 15 \text{ cm}$$

s calculado é maior que s_{\max} , portanto será usado $s = 14 \text{ cm}$. Adotado então $\Phi 5$ a cada 14 cm para a armadura transversal. O cálculo para todos os trechos é resumido na tabela abaixo

TABELA 4.6.2 – ARMADURA TRANSVERSAL DA VIGA 43

Trecho		1	2	3	4
Φ Estribos	m	0,5	0,5	0,5	0,5
$\alpha v2$	-	0,9	0,9	0,9	0,9
VRd2	kN	108,2	117,5	113,2	113,2
Vsd	kN	38,8	27,5	38,5	23,6
Vc,I	kN	22,2	24,0	23,2	23,2
Vc,II	kN	17,9	23,2	19,2	23,1
Vsw	kN	20,9	4,3	19,3	0,5
A _{sw}	m ² /m	1,29E-04	2,46E-05	1,13E-04	3,19E-06
A _{sw,min}	m ² /m	1,01E-04	1,01E-04	1,01E-04	1,01E-04
s _{max}	m	0,14	0,15	0,15	0,15
A _{s,uni}	m ²	1,96E-05	1,96E-05	1,96E-05	1,96E-05
s	m	0,15	0,19	0,17	0,19
s _{efe}	cm	14	15	15	15

4.6.4 – Estado Limite de Serviço

Na verificação do Estado Limite de Serviço ELS, segue os mesmos processos utilizados nas lajes, em que é verificado se ocorre a fissuração ou não na viga, e caso ocorra será necessário considerar a componente de fissuração na flecha e deverá ser verificada a abertura das fissuras. Assim, para isso, é calculado a momento de inércia no estágio II puro para cada posição da viga.

TABELA 4.6.3 – CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA NO ESTÁDIO II PURO

		apoio 1	vão 1	apoio 2	vão 2	apoio 3	vão 3	apoio 4
b	m	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
a1		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
E _s	kN/m ²	2,10E+05	2,10E+05	2,10E+05	2,10E+05	2,10E+05	2,10E+05	2,10E+05
E _{cs}	kN/m ²	2,80E+04	2,80E+04	2,80E+04	2,80E+04	2,80E+04	2,80E+04	2,80E+04
αe		7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
A _s	m ²	2,36E-04	3,14E-04	2,36E-04	6,23E-05	2,36E-04	2,01E-04	2,01E-04
a2		1,77E-03	2,36E-03	1,77E-03	4,67E-04	1,77E-03	1,51E-03	1,51E-03
d	m	0,245	0,240	0,245	0,261	0,245	0,251	0,251
a3		-4,33E-04	-5,65E-04	-4,33E-04	-1,22E-04	-4,33E-04	-3,78E-04	-3,78E-04
xII 1	m	7,15E-02	7,94E-02	7,15E-02	4,13E-02	7,15E-02	6,78E-02	6,78E-02
xII 2	m	-1,01E-01	-1,19E-01	-1,01E-01	-4,91E-02	-1,01E-01	-9,30E-02	-9,30E-02
xII	m	7,15E-02	7,94E-02	7,15E-02	4,13E-02	7,15E-02	6,78E-02	6,78E-02
I _{c,II}	m ⁴	6,78E-05	8,08E-05	6,78E-05	2,53E-05	6,78E-05	6,31E-05	6,31E-05

Assim, utilizando a relação entre o momento de fissuração e o momento resultante da carga quase permanente de serviço é definido um momento de inércia equivalente para o estado de transição que a viga se encontra entre o estágio I e o estágio II puro. No entanto, como este valor não é único para todo o trecho da viga, é necessário fazer uma soma ponderada entre os momentos de inércia considerando 15% $I(c,eq)$ para os apoios e 70% $I(c,eq)$ para os vãos. Com isto, é calculado o a altura equivalente que usada no programa ftool para obter a flecha imediata que considera a deformação elástica e fissuração. A flecha final considera $\alpha f=1,32$ com a retirada das escoras em 14 dias e tempo final tendendo ao infinito. A tabela abaixo apresenta esta verificação da flecha.

TABELA 4.6.4 – CÁLCULO DA FLECHA DA VIGA 43

Trecho		V43 a			V43 b		
Posição	-	apoio 1	vão 1	apoio 2	apoio 2	vão 2	apoio 3
Mr,m	kN.m	6,93	6,93	6,93	6,93	6,93	6,93
Ma	kN.m	13,2	8,7	9,5	9,5	1,5	10,8
I(c,I)	m ⁴	2,70E-04	2,70E-04	2,70E-04	2,70E-04	2,70E-04	2,70E-04
I(c,II)	m ⁴	6,78E-05	8,08E-05	6,78E-05	6,78E-05	2,53E-05	6,78E-05
I(c,eq)	m ⁴	9,70E-05	1,76E-04	1,46E-04	1,46E-04	2,70E-04	1,21E-04
I(c,eq)viga	m ⁴	1,60E-04			2,29E-04		
h(eq)	m	0,252			0,284		
Flecha 0	mm	2,607			0,543		
Flecha f	mm	6,048			1,260		
F adm	mm	16,6			10,28		

TABELA 4.6.4 – CONTINUAÇÃO

Trecho		V43 c			43 d
Posição	-	apoio 3	vão 3	apoio 4	apoio 4
Mr,m	kN.m	6,93	6,93	6,93	6,93
Ma	kN.m	10,8	8,5	11,9	11,9
I(c,I)	m ⁴	2,70E-04	2,70E-04	2,70E-04	2,70E-04
I(c,II)	m ⁴	6,78E-05	6,31E-05	6,31E-05	6,31E-05
I(c,eq)	m ⁴	1,21E-04	1,75E-04	1,04E-04	1,04E-04
I(c,eq)viga	m ⁴	1,56E-04			1,04E-04
h(eq)	m	0,250			0,218
Flecha 0	mm	3,004			0,945
Flecha f	mm	6,969			2,192
F adm	mm	17,2			4,6

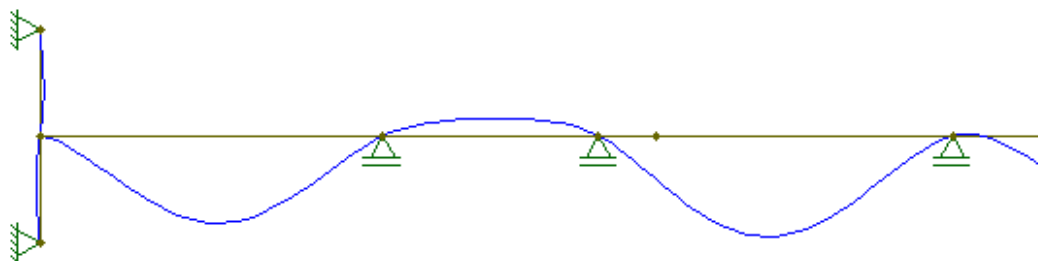


FIGURA 4.6.5 – GRÁFICO DA FLECHA IMEDIATA DA VIGA 43

A verificação da fissuração segue o mesmo processo efetuado para lajes

TABELA 4.6.5 – CÁLCULO DA ABERTURA DE FISSURAÇÃO DA VIGA 43

		apoio 1	vão 1	apoio 2	vão 2	apoio 3	vão 3	apoio 4
Md,freq	kN.m	11,1	9,7	10,8	1,5	10	8,1	13,4
I(c,II)	m ⁴	6,78E-05	8,08E-05	6,78E-05	2,53E-05	6,78E-05	6,31E-05	6,31E-05
αe	-	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
d	m	0,245	0,240	0,245	0,261	0,245	0,251	0,251
d"	m	0,055	0,060	0,055	0,039	0,055	0,049	0,049
x(II)	m	0,07	0,08	0,07	0,04	0,07	0,07	0,07
y(sí)	m	0,174	0,161	0,174	0,219	0,174	0,183	0,183
σ (sí)	kN/m ²	2,13E+05	1,45E+05	2,07E+05	9,75E+04	1,92E+05	1,76E+05	2,92E+05
n _i	-	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Φ_i	m	0,01	0,01	0,01	0,0063	0,01	0,008	0,008
E(sí)	kN/m ²	2,10E+08	2,10E+08	2,10E+08	2,10E+08	2,10E+08	2,10E+08	2,10E+08
f(ck,m)	kN/m ²	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565
D(x1)	m	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
D(x2)	m	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
D(y1)	m	0,03	0,03	0,03	0,0263	0,03	0,028	0,028
D(y2)	m	0,055	0,06	0,055	0,03945	0,055	0,049	0,049
As (uma barra)	m ²	7,85E-05	7,85E-05	7,85E-05	3,12E-05	7,85E-05	5,02E-05	5,02E-05
A(cr)	m ²	5,10E-03	5,40E-03	5,10E-03	3,95E-03	5,10E-03	4,62E-03	4,62E-03
p(ri)	-	1,54E-02	1,45E-02	1,54E-02	7,90E-03	1,54E-02	1,09E-02	1,09E-02
w(1)	m	8,99E-05	4,14E-05	8,51E-05	1,19E-05	7,30E-05	4,93E-05	1,35E-04
w(2)	m	1,10E-04	7,84E-05	1,07E-04	5,74E-05	9,91E-05	9,87E-05	1,63E-04
w	mm	0,09	0,04	0,09	0,01	0,07	0,05	0,14
w(limite)	mm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Dentro do limite?		SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

4.6.5 – Ancoragem nos apoios

O detalhamento envolve o cálculo do comprimento de ancoragem necessário e a distribuição longitudinal das armaduras. O cálculo do comprimento necessário utiliza a seguinte formula:

$$L_{b,nec} = \alpha_1 * L_b * (A_{s,cal} / A_{s,efe}) \geq L_{b,min}$$

Sendo que:

- $\alpha_1 = 1$ para barra sem gancho (0,7 com gancho)
- L_b : Comprimento de ancoragem básico
- $A_{s,cal}$: Armadura do vão no caso de apoios intermediários
- $A_{s,efe}$: Armadura efetiva que chega até os apoios que deve ser maior ou igual a $1/3$ da armadura do vão e de duas barras no mínimo
- $L_{b,min}$: Comprimento de ancoragem mínimo, que deve ser maior ou igual que $0,3 * L_b$, $10 * \phi$ e 100 mm

$A_{s,cal}$ para casos de apoios extremos é a armadura necessária para garantir a ancoragem da diagonal de compressão capaz de resistir a força de tração $R_{st} = (aL/d) * V_d + N_d$, onde V_d é a força cortante no apoio e N_d é a força de tração eventualmente existente. Assim, utilizando o modelo 2 para calcular a decalagem (aL) com $\theta = 30^\circ$

$$aL = \sqrt{(3 * d)/2} = 0,85 * d$$

portanto:

$$A_{s,cal} = 0,87 * V_d / f_{yd}$$

O comprimento de ancoragem básico é calculado pela equação:

$$L_b = (\phi * f_{yd}) / (4 * f_{bd})$$

Sendo:

- ϕ : Diâmetro da armadura que chega ao apoio
- f_{yd} : Tensão de cálculo da armadura
- f_{bd} : Tensão de aderência para a ancoragem, calculado por $f_{bd} = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * f_{ctd,ifn}$. Onde $\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas; $\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência (0,7 para má aderência); e $\eta_3 = 1,0$ para $\phi \leq 32$ mm

Assim, no caso do apoio 1 que é de extremidade com armadura positiva do vão 1 de $\phi = 10$ mm chegando nele, será considerada situação de boa aderência e portanto:

$$f_{bd} = 2,25 * 1,0 * 1,0 * 1,28 = 2,88 \text{ MPa}$$

$$L_b = (10 * 434,783) / (4 * 2,88) = 377 \text{ mm}$$

$$L_{b,min} = 0,3 * 377 = 133 \text{ mm} > 100 \text{ mm}$$

Como se trata de um apoio de extremidade com o valor de cálculo da força cortante no apoio de 39 kN, assim é determinado $A_{s,cal}$:

$$A_{s,cal} = 0,87 * 39 / 434783 = 7,81E-5 \text{ m}^2$$

Por, fim considerando a utilização de gancho ($\alpha_1 = 0,7$) e duas barras de $\phi = 10 \text{ mm}$ chegando ao apoio ($A_{s,efe} = 1,57E-4 \text{ m}^2$) é calculado o comprimento necessário de ancoragem ($L_{b,nec}$)

$$L_{b,nec} = 0,7 * 377 * (7,81E-5 / 1,54E-4) = 131 \text{ mm}$$

Como $L_{b,disp} = 200 - 30 = 170 \text{ mm}$, o comprimento de ancoragem será cumprido.

O raio de curvatura do gancho será de:

$$r_i = 2,5 * \phi = 2,5 * 10 = 25 \text{ mm}$$

E o comprimento vertical da armadura será de

$$CV = 8 * \phi + r_i + \phi/2 = 8 * 10 + 25 + 10/2 = 110 \text{ mm}$$

Para o apoio 2 aonde chega a armadura positiva o vão 1 de $\phi = 10$, o processo segue o mesmo no entanto $A_{s,calc}$ será agora a armadura calculada na dimensão da seção da viga, portanto abaixo segue os cálculos para esta ancoragem

$$f_{bd} = 2,25 * 1,0 * 1,0 * 1,28 = 2,88 \text{ MPa}$$

$$L_b = (10 * 434,783) / (4 * 2,88) = 377 \text{ mm}$$

$$L_{b,min} = 0,3 * 377 = 133 \text{ mm} > 100 \text{ mm}$$

$$A_{s,cal} = 2,87E-4 \text{ m}^2$$

Com duas barras chegando ao apoio $A_{s,efe} = 1,54E-4$ e utilizando gancho ($\alpha_1 = 0,7$)

$$L_{b,nec} = 0,7 * 377 * (2,87E-4 / 1,54E-4) = 407 \text{ mm}$$

$$L_{b,disp} = 400 - 30 = 370 \text{ mm}$$

Como $L_{b,nec} > L_{b,disp}$, será recalculado $L_{b,nec}$ agora com 3 barras chegando até o apoio ($A_{s,efe} = 2,36E-4$)

$$L_{b,nec} = 0,7 * 377 * (2,36E-4 / 1,54E-4) = 320 \text{ mm}$$

Portanto, respeita o comprimento de ancoragem disponível.

O comprimento total reto será então de:

$$CR = C_{tot} - 2 * c + \phi = 445 - 2 * 3 + 1 = 440 \text{ cm}$$

A tabela a seguir apresenta resumidamente o calculo de ancoragem para os demais pontos da viga.

TABELA 4.6.6 – CÁLCULO A ANCORAGEM

Vão	-	2	3
Aderência	-	BOA	BOA
Gancho	-	NÃO	SIM
ϕ	m	0,0063	0,008
n barras no apoio		2	2
lb	m	0,237312	0,301348
lb,min	0,3lb	0,071193	0,090404
	10 ϕ	0,063	0,080
	100mm	0,001	0,001
lb,min	m	0,0712	0,090
As,calc	m ²	4,17E-05	1,50E-04
lb,nec	m	0,16	0,32
lb,disp	m	0,37	0,37
Dentro dos limites?		SIM	SIM
CV	cm	0	9
CR	cm	296	451

Quanto a ancoragem das armaduras negativas, na situação de balanço duas barras são prolongadas com gancho de comprimento vertical até o cobrimento inferior da viga. Na situação de extremidade do apoio em pilar será usado duas barras com gancho de comprimento vertical de $25 * \phi$.

4.6.6 – Distribuição Longitudinal

A distribuição longitudinal do Vão 1 será realizada para a armadura positiva de 4 ϕ 10 (n = 4), com 2 barras na primeira camada (n1 = 2) e 2 barras na segunda (n2 = 2), d = 24 cm, d'' = 6 cm, aL = 21 cm, Lb,esq = 13 cm, Lb,dir = 32 cm, Vd = 39 kN, Md = 22,6 MPa, pd = 18,66 kN/m

Assim, é calculado Mi para cada barra da armadura em que $M_i = i * M_d / n$

$$M_1 = 1 * 22,66 / 4 = 5,65 \text{ MPa}$$

$$M_2 = 2 * 22,66 / 4 = 11,3 \text{ MPa}$$

$$M3 = 3 * 22,66 / 4 = 16,95 \text{ MPa}$$

$$M4 = 4 * 22,66 / 4 = 22,66 \text{ MPa}$$

E é calculado assim m_i para cada M_i , $m_i = (V - \sqrt{V^2 - 2 * p * M_i}) / p$

$$m1 = (39 - \sqrt{39^2 - 2 * 18,66 * 5,65}) / 18,66 = 0,15 \text{ m}$$

$$m2 = (39 - \sqrt{39^2 - 2 * 18,66 * 11,3}) / 18,66 = 0,32 \text{ m}$$

$$m3 = (39 - \sqrt{39^2 - 2 * 18,66 * 16,95}) / 18,66 = 0,50 \text{ m}$$

$$m4 = (39 - \sqrt{39^2 - 2 * 18,66 * 22,66}) / 18,66 = 0,70 \text{ m}$$

Após isso é definido d_i , sendo d_i a distancia da barra até a ancoragem no apoio, como ocorrem ancoragens diferentes em cada apoio será calculado $d_{i,esq}$ e $d_{i,dir}$.

$d1,esq = d2,esq = 0$ pois são as barras q ancoram no apoio

$$d3,esq \leq m3 - (aL + Lb,esq) = 50 - (21 + 13) = 15 \text{ cm}$$

$$m2 - (aL + 10 \phi) = 32 - (21 + 10) = 1 \text{ cm}$$

$$d4,esq \leq m4 - (aL + Lb,esq) = 70 - (21 + 13) = 36 \text{ cm}$$

$$m3 - (aL + 10 \phi) = 50 - (21 + 10) = 19 \text{ cm}$$

$d1,dir = d2,dir = d3,dir = 0$ pois são barras que ancoram no apoio

$$d4,dir \leq m4 - (aL + Lb,dir) = 70 - (21 + 32) = 17 \text{ cm}$$

$$m3 - (aL + 10 \phi) = 50 - (21 + 10) = 19 \text{ cm}$$

Assim, é calculado o comprimento das barras, $C = C_{tot} - d_{i,esq} - d_{i,dir}$

$$C1 = C2 = C_{tot} = 440 \text{ cm}$$

$$C3 = C_{tot} - d3,esq = 440 - 15 = 425 \text{ cm}$$

$$C4 = C_{tot} - d4,esq - d4,dir = 440 - 36 - 19 = 385 \text{ cm}$$

No vão 3 a armadura de $4 \phi 8$ ($n = 4$), com 2 barras na primeira camada ($n1 = 2$) e 2 barras na segunda ($n2 = 2$), $d = 25 \text{ cm}$, $d'' = 5 \text{ cm}$, $aL = 22 \text{ cm}$, $Lb = 32 \text{ cm}$, $Vd = 38,5 \text{ kN}$, $Md = 16,04 \text{ MPa}$, $pd = 14,06 \text{ kN/m}$

Assim, é repetido o mesmo processo utilizado no vão 1

$$M1 = 1 * 16,40 / 4 = 4,1 \text{ MPa}$$

$$M2 = 2 * 16,40 / 4 = 8,2 \text{ MPa}$$

$$M3 = 3 * 16,40 / 4 = 12,3 \text{ MPa}$$

$$M4 = 4 * 16,40 / 4 = 16,40 \text{ MPa}$$

$$m1 = (38,5 - \sqrt{38,5^2 - 2 * 14,06 * 4,1}) / 14,06 = 0,11 \text{ m}$$

$$m2 = (38,5 - \sqrt{38,5^2 - 2 * 14,06 * 8,2}) / 14,06 = 0,22 \text{ m}$$

$$m3 = (38,5 - \sqrt{(38,5^2 - 2 * 14,06 * 12,3)}) / 14,06 = 0,34 \text{ m}$$

$$m4 = (38,5 - \sqrt{(38,5^2 - 2 * 14,06 * 16,4)}) / 14,06 = 0,47 \text{ m}$$

$$d1 = d2 = 0 \text{ pois são as barras q ancoram no apoio}$$

$$d3 \leq m3 - (aL + Lb) = 50 - (21 + 32) = -20 \text{ cm}$$

$$m2 - (aL + 10 \phi) = 32 - (21 + 8) = -8 \text{ cm}$$

$$d4 \leq m4 - (aL + Lb) = 70 - (21 + 32) = -7 \text{ cm}$$

$$m3 - (aL + 10 \phi) = 50 - (21 + 8) = 4 \text{ cm}$$

Assim, é calculado o comprimento das barras, $C = C_{tot} - d_{esq} - d_{dir}$

$$C1 = C2 = C_{tot} = 451 \text{ cm}$$

$$C3 = C_{tot} - d3 = 425 - 2 * 0 = 425 \text{ cm}$$

$$C4 = C_{tot} - d4 = 425 - 2 * 4 = 417 \text{ cm}$$

A distribuição longitudinal da armadura negativa no apoio 1 de 3 ϕ 10 ($n = 3$), $n1 = 2$, $n2 = 3$, $d = 24,5 \text{ cm}$, $d'' = 5,5 \text{ cm}$, $aL = 21 \text{ cm}$, $Lb = (10 * 434,783) / (4 * 2,02) = 54 \text{ cm}$ (má aderência), $V = 39 \text{ kN}$, $X = 21,50 \text{ MPa}$, $p = 18,66 \text{ kN/m}$

Primeiramente é calculado ΔX , em que $\Delta X = X / n = 21,50 / 3 = 7,17 \text{ MPa}$, e com isto é definido m_i , pela expressão:

$$m_i = (V - \sqrt{(V^2 - 2 * p * (X - (3-i) * \Delta X))}) / p$$

$$m1 = (39 - \sqrt{(39^2 - 2 * 18,66 * (21,50 - 2 * 7,17))}) / 18,66 = 0,19 \text{ m}$$

$$m2 = (39 - \sqrt{(39^2 - 2 * 18,66 * (21,50 - 1 * 7,17))}) / 18,66 = 0,41 \text{ m}$$

$$m3 = (39 - \sqrt{(39^2 - 2 * 18,66 * (21,50 - 0))}) / 18,66 = 0,66 \text{ m}$$

Agora, pode ser calculado o comprimento “ d_i ” de cada barra

$$d1 \leq m1 + aL + Lb = 19 + 21 + 54 = 94 \text{ cm}$$

$$m2 + aL + 10 \phi = 41 + 21 + 10 = 72 \text{ cm}$$

$$d2 \leq m2 + aL + Lb = 19 + 21 + 54 = 116 \text{ cm}$$

$$m3 + aL + 10 \phi = 41 + 21 + 10 = 72 \text{ cm}$$

$$d3 \leq m3 + aL + Lb = 19 + 21 + 54 = 141 \text{ cm}$$

Assim, o comprimento de cada barra é definido $C1 = 94 \text{ cm}$, $C2 = 116 \text{ cm}$ e $C3 = 141 \text{ cm}$.

As tabelas seguintes apresentam resumidamente calculo do comprimento das barras restantes de toda a viga.

TABELA 4.6.7 – CÁLCULOS DA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL

Apoio	unidade	1, extr	2,esq	2,dir	3,esq	3,dir	4,esq	4,dir
ϕ	mm	10	10	10	10	10	8	8
n	ud	3	3	3	3	3	4	4
n1	ud	2	2	2	2	2	2	2
n2	ud	1	1	1	1	1	2	2
d"	m	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,049	0,049
d	m	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,251	0,251
aL	m	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
V	kN	39	38,6	27,5	27	38,5	31	23,6
p	kN/m	18,66	18,66	20,91	20,91	20,91	14,06	14,06
X	kNm	21,5	21,00	21,00	20,30	20,30	17,7	17,7
ΔX	kNm	7,17	7,00	7,00	6,77	6,77	4,425	4,425
m4	m	-	-	-	-	-	0,67	1,13
m3	m	0,66	0,64	1,32	1,29	0,64	0,48	0,71
m2	m	0,41	0,40	0,69	0,68	0,39	0,31	0,43
m1	m	0,19	0,19	0,29	0,28	0,19	0,15	0,20
Lb	m	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,43	0,43
d1	m	0,94	0,94	1,03	1,03	0,93	0,80	0,85
		0,72	0,71	1,00	0,99	0,70	0,61	0,73
d2	m	1,16	1,15	1,44	1,43	1,14	0,96	1,08
		0,97	0,95	1,63	1,60	0,95	0,78	1,01
d3	m	1,41	1,39	2,06	2,04	1,39	1,13	1,37
							0,97	1,43
d4	-	-	-	-	-	-	1,32	1,78
C1	m	0,94	0,94	1,03	1,03	0,93	0,80	0,85
C2	m	1,16	1,15	1,44	1,43	1,14	0,96	1,08
C3	m	1,41	1,39	2,06	2,04	1,39	1,13	1,43
C4	m	-	-	-	-	-	-	1,78

5 – CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou que mesmo para pavimento com pequenos vão, a escolha do tipo de laje pode não ser nítida a primeira mão. Somente após o dimensionamento dos três tipos aqui estudados que se definiu com clareza que a laje nervurada bi-direcional é a melhor solução para este pavimento com sua economia de concreto vencendo a economia de aço de laje nervurada unidirecional.

Para realizar uma maior economia de concreto na laje nervurada unidirecional, seria necessário utilizar mais opções de seções/alturas para as lajes, no entanto, isso causaria problemas durante a execução atrapalhando o rendimento e gastando mais formas para atender as diferentes alturas.

Assim, seria necessário em situação real que vai além do que esse trabalho propõe fazer, considerar diversos outros fatores como o rendimento do trabalho na execução, o conforto térmico que deseja ser estabelecido, o custo dos materiais de preenchimentos utilizados nas lajes nervuradas e os efeitos que as opções causam no resto da estrutura.

Cada caso na engenharia deve ser considerado como único, a solução mais utilizada nem sempre pode ser a melhor. Por tanto, é necessário sempre realizar um estudo envolvendo todas as alternativas disponíveis para se chegar à melhor solução.

5.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, recomenda-se realizar o dimensionamento para estruturas maiores para que apresentem resultados mais significativos e sem um elevado número de diferentes lajes para evitar a repetição dos processos para cada laje do projeto.

Sugere-se também realizar uma comparação do método clássico de cálculo de lajes com o método de analogia de grelha que considera a rigidez das nervuras secundárias, assim seria necessário a utilização de softwares que realizam tal cálculo.

6 – REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

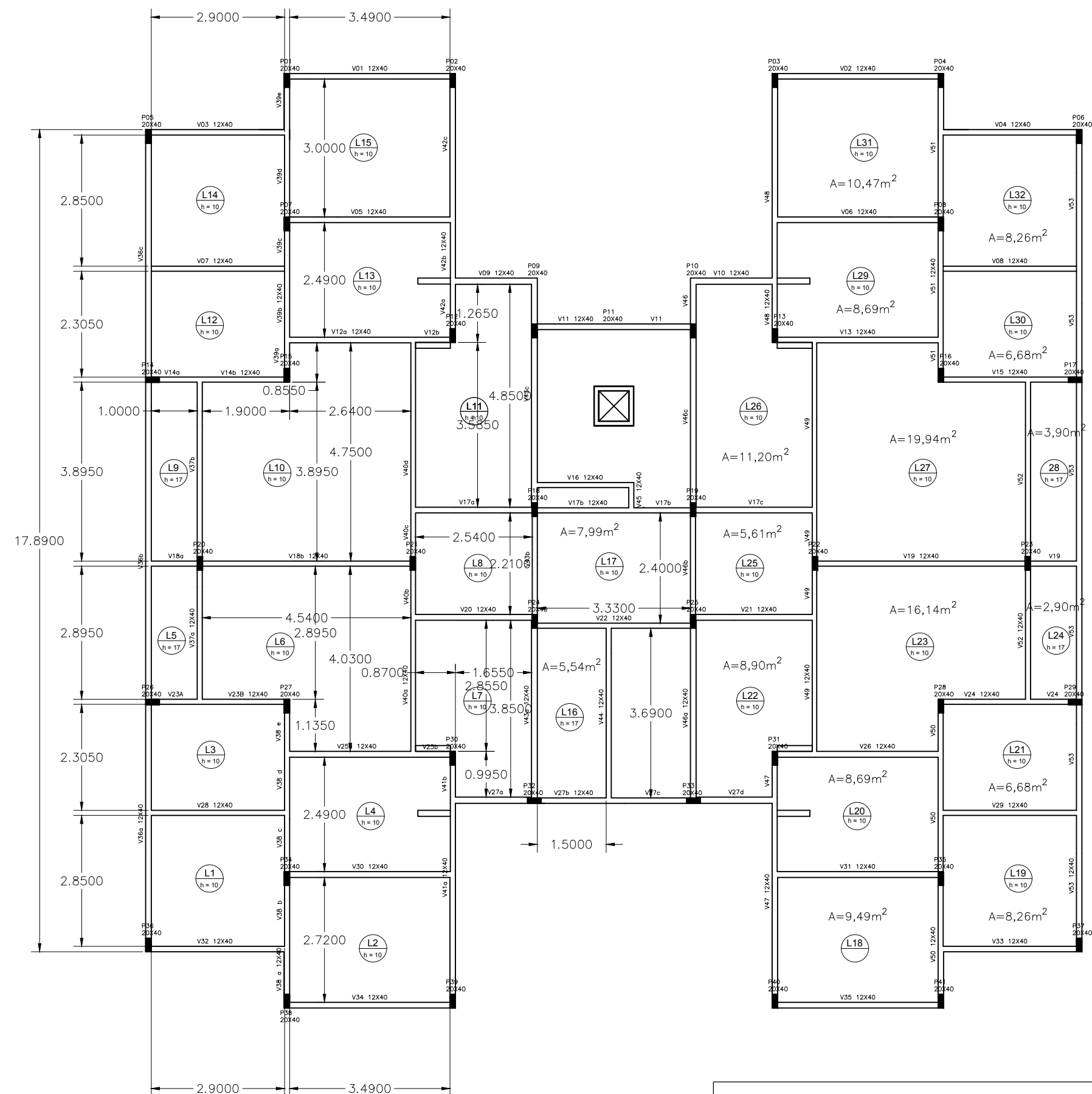
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8618**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003

PINHEIRO, Libânio M. **Tabelas de lajes**. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007

SILVA, Marcos Alberto Ferreira. **Projeto e Construção de Lajes Nervuradas de Concreto Armado**. Universidade Federal de São Carlos – Centro de ciências Exatas e de Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. São Carlos, 2005

MARCELLINO, Narbal Ataliba. **Notas de Aula**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Disciplina ECV 5228/5648 Estruturas de Concreto. Florianópolis, 2017.

PERLIN, Lourenço Panosso. **Alternativas para Projeto Estrutural de Pavimento Tipo em Concreto Armado**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis, 2009



Planta Baixa Estrutural Pavimento Tipo

Projeto Laje Nervurada

PLANTA BAIXA ESTRUTURAL DO PAVIMENTO TIPO

ORIENTADOR: NARBAL A. MARCELINO

GRADUANDO: CLAU MARCÉLIO DA SILVA FILHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

FOLHA:

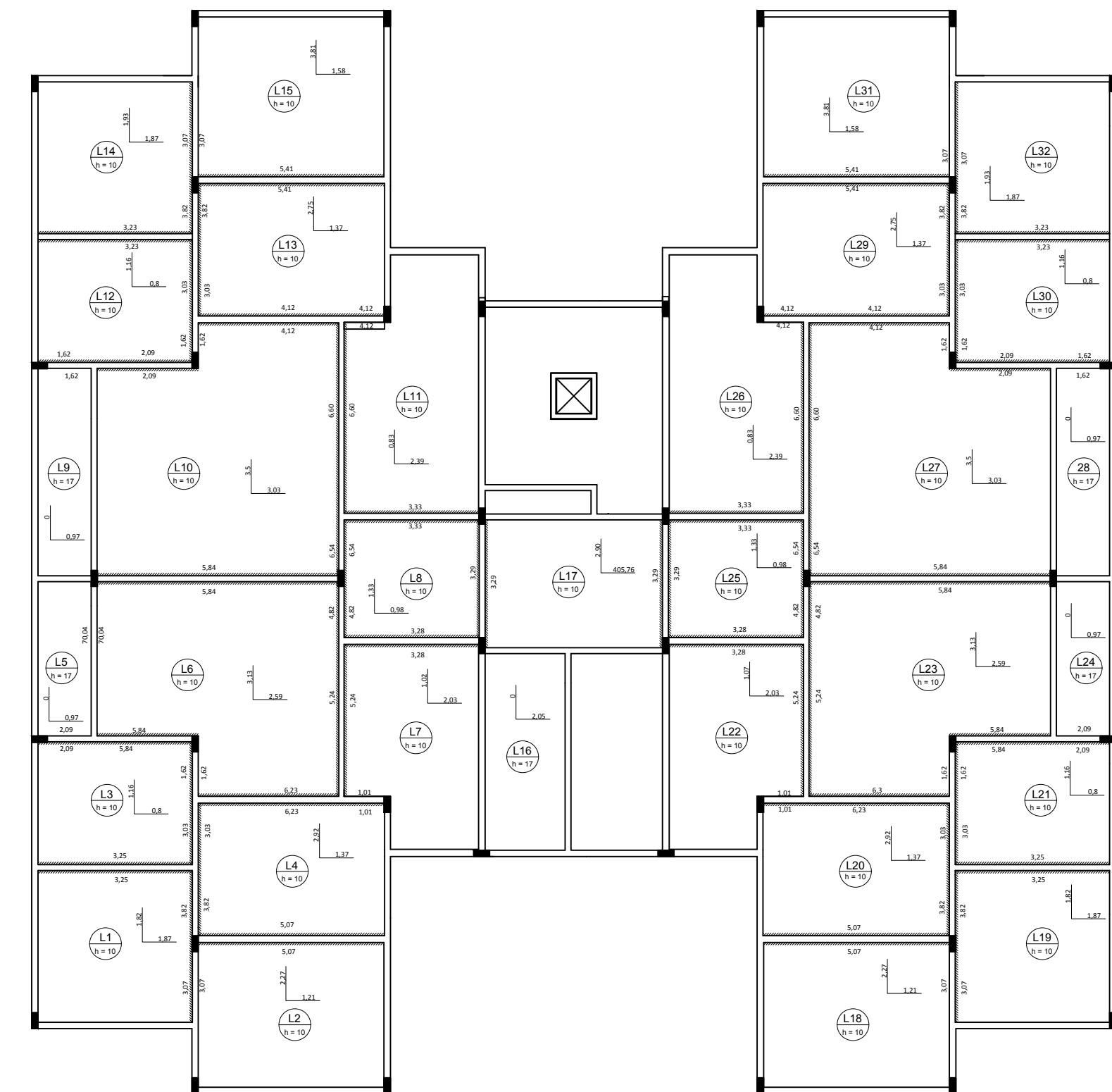
01/05

DATA:

17/11/2017

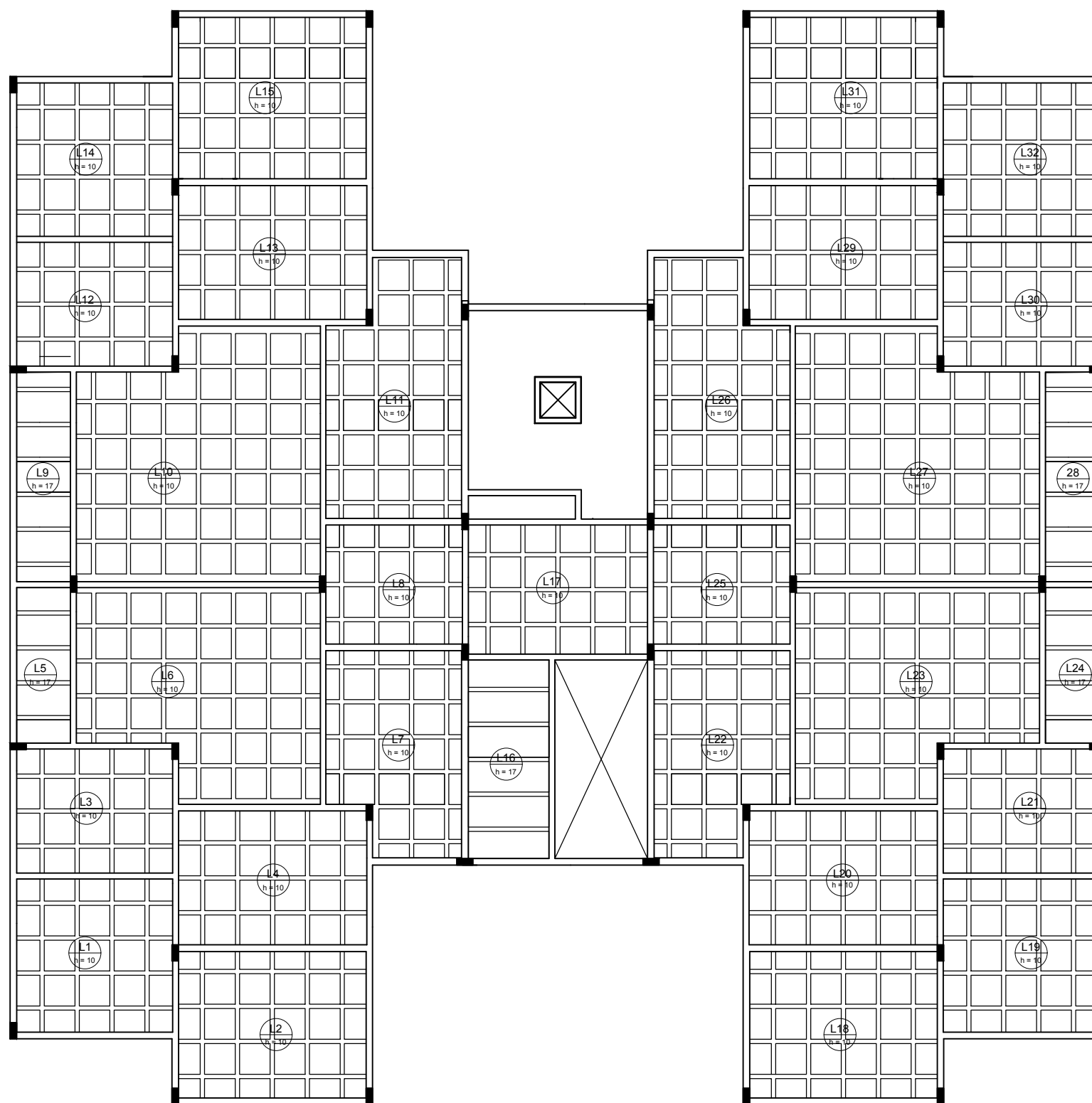
ESCALA:

1:100



Momentos das lajes no ELU (kNm/m)

Projeto Laje Nervurada		
MOMENTOS DAS LAJES NO ELU (kNm/m)		
ORIENTADOR: NARBAL A. MARCELINO		FOLHA:
GRADUANDO: CLAU MARCÉLIO DA SILVA FILHO		02/05
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		ESCALA:
17/11/2017		1:100



Planta de Formas das lajes

Projeto Laje Nervurada

PLANTA DE FORMAS DO PAVIMENTO TIPO

ORIENTADOR: NARBAL A. MARCELINO

GRADUANDO: CLAUD MARCÉLIO DA SILVA FILHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

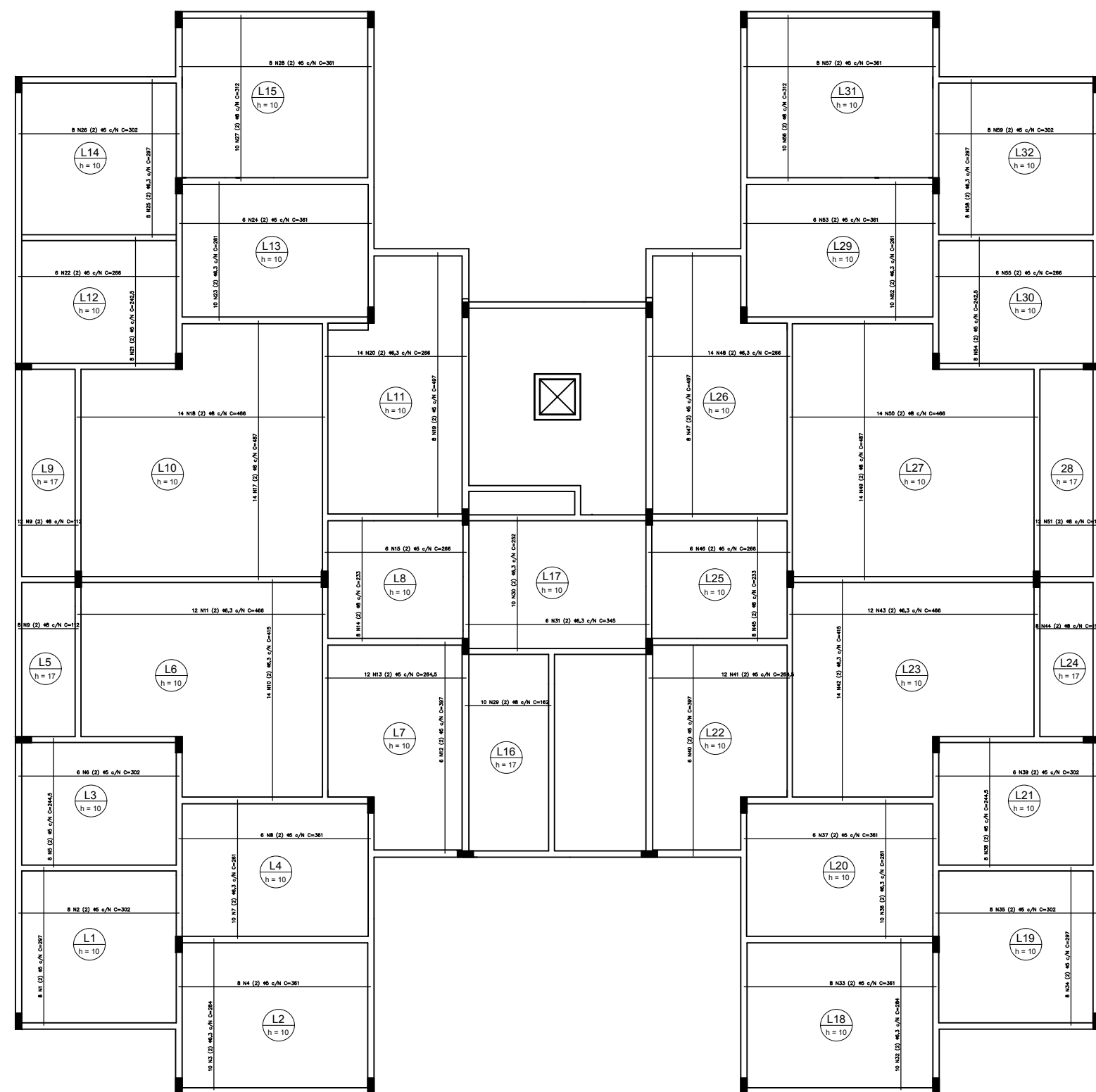
DATA: 17/11/2017

FOLHA:

03/05

ESCALA:

1:100



Armaduras positivas das lajes

Projeto Laje Nervurada

ARMADURAS POSITIVAS DAS LAJES

ORIENTADOR: NARBAL A. MARCELINO

GRADUANDO: CLAUZ MARCÉLIO DA SILVA FILHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

FOLHA:

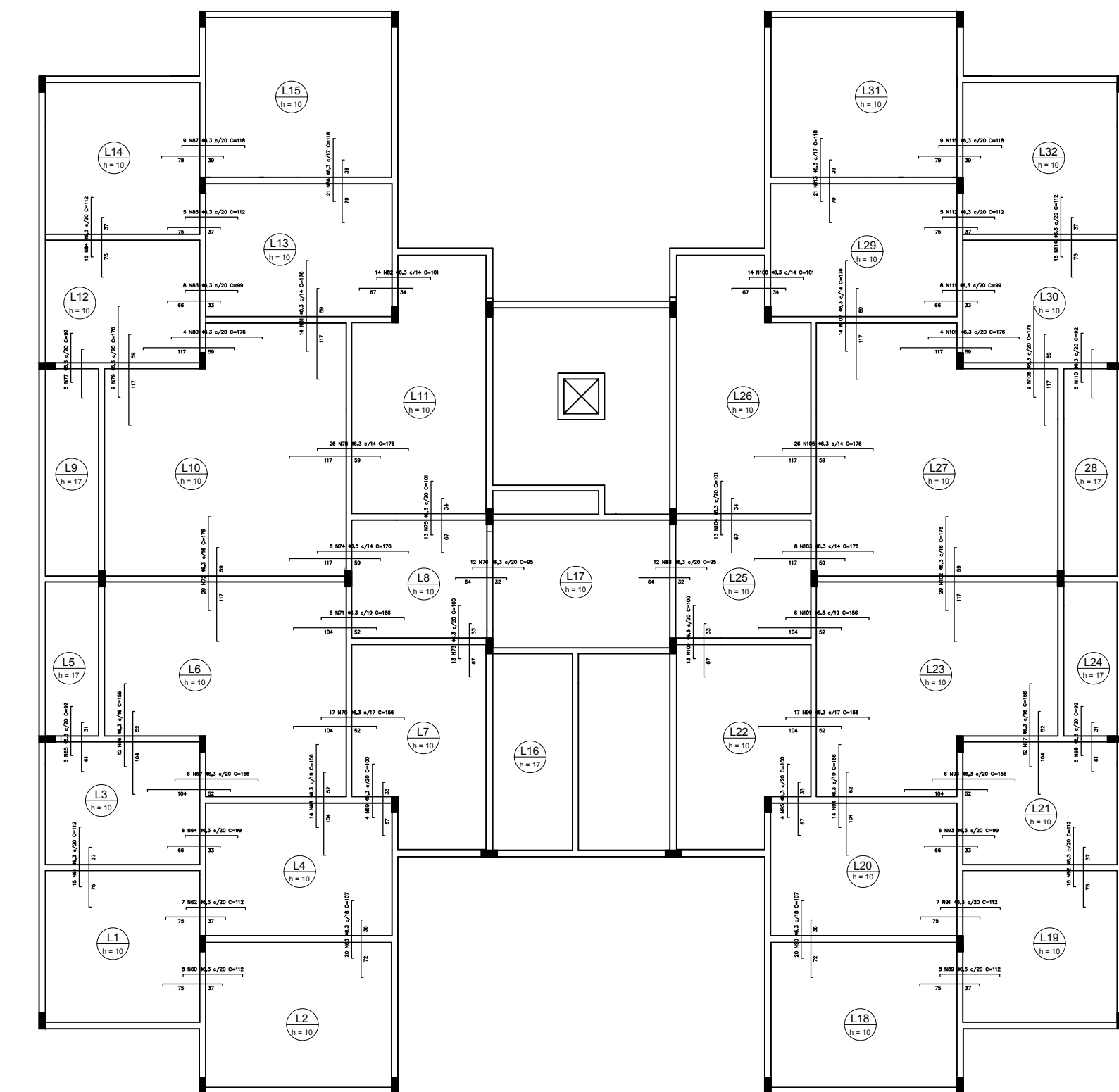
04/05

DATA:

17/11/2017

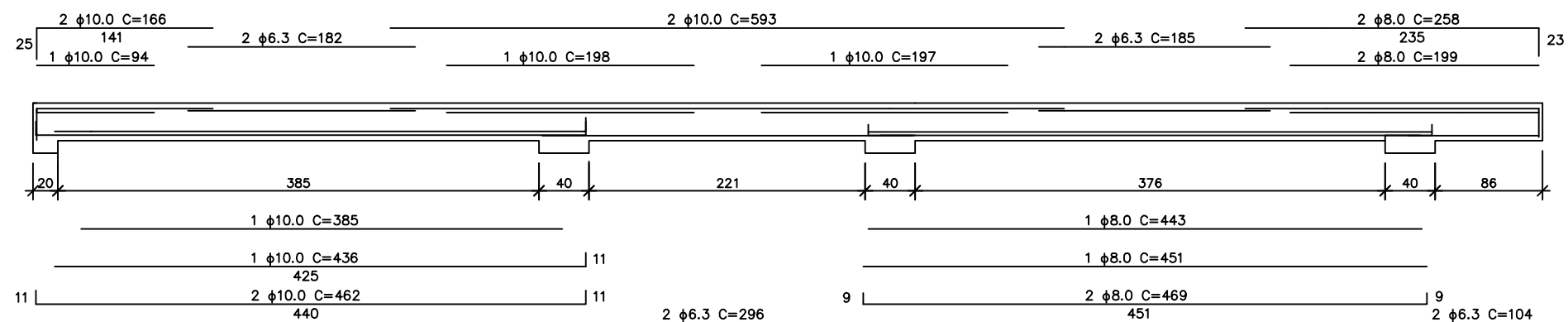
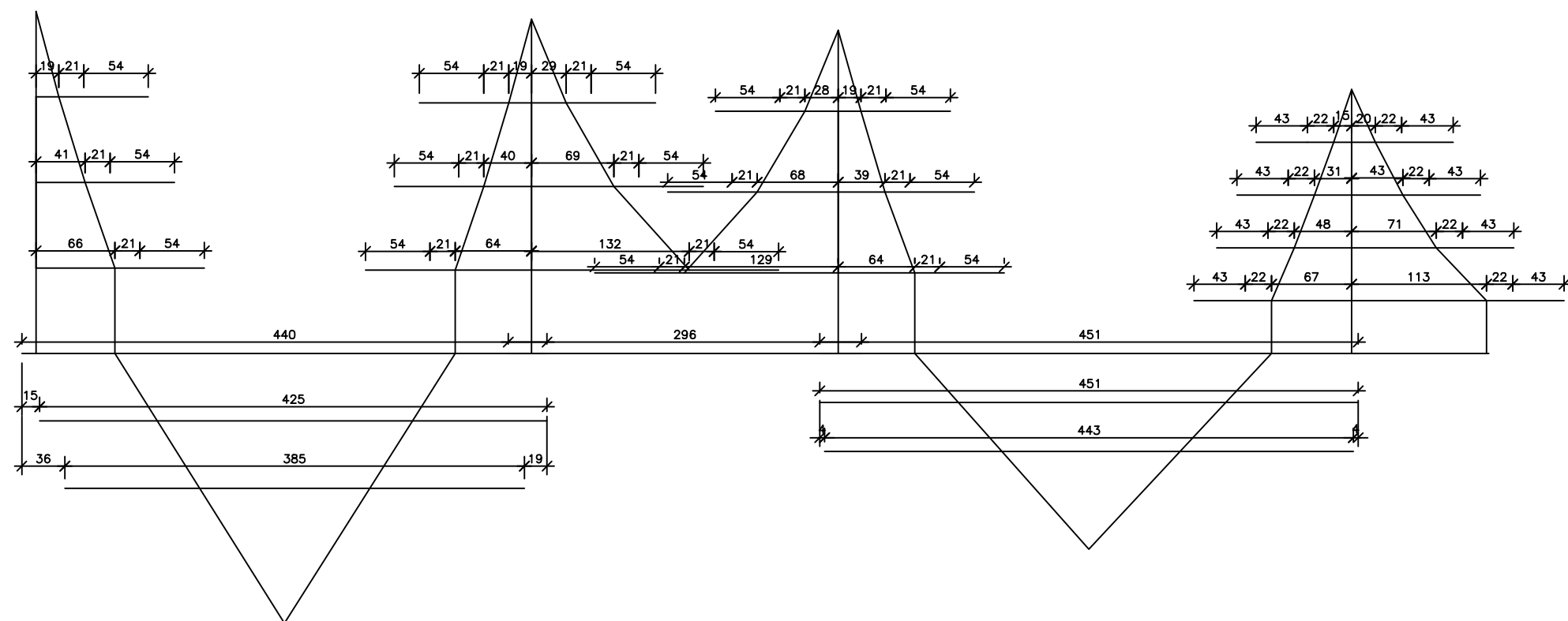
ESCALA:

1:100



Armaduras negativas das lajes

Projeto Laje Nervurada		
ARMADURAS NEGATIVAS DAS LAJES		
ORIENTADOR: NARBAL A. MARCELINO		
GRADUANDO: CLAUD MARCÉLIO DA SILVA FILHO		
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA		
DATA:	17/11/2017	FOLHA: 05/05
ESCALA:	1:100	



DETALHAMENTO VIGA 43

DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL VIGA 43

ORIENTADOR: NARBAL A. MARCELINO

GRADUANDO: CLAU MARCÉLIO DA SILVA FILHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

FOLHA:

01/01

DATA:

17/11/2017

ESCALA:

1:50